

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



ДЕНЕЖКИН ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ
АППАРАТУРЫ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ
ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ ПРИ ЭЛЕКТРОТЯГЕ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

2.9.4. Управление процессами перевозок

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Шаманов Виктор Иннокентьевич

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ПРОЦЕССЫ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОГО ТОКА НА РАБОТУ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ	11
1.1 Влияние помехоустойчивости рельсовых цепей и автоматической ло- комотивной сигнализации на безопасность и бесперебойность движения поездов	11
1.2 Тяговая сеть как источник помех	14
1.3 Анализ статистических данных по влиянию тягового тока на работу рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации	23
1.4 Анализ научных исследований влияния тягового тока на работу рель- совых цепей и автоматической локомотивной сигнализации	26
1.5 Выводы по главе	33
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОМЕХ ОТ ТЯГОВОГО ТОКА В НЕОДНОРОДНОЙ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ НА АППАРАТУРУ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ	34
2.1 Схема замещения тяговой рельсовой линии	34
2.2 Методика вычисления сопротивлений в расчётной схеме	38
2.3 Методика вычисления тяговых токов в расчётной схеме при нормаль- ном режиме работы рельсовой цепи	40
2.4 Методика вычисления тяговых токов под катушками автоматической локомотивной сигнализации	45
2.5 Методика вычисления тяговых токов под катушками автоматической локомотивной сигнализации на перегоне с бесстыковыми рельсовыми цепями с уравнивающими дросселями	48
2.6 Проверка корректности разработанной методики	52

2.7 Выводы по главе	57
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ ОТ ПЕРЕМЕННОГО ТЯГОВОГО ТОКА НА АППАРАТУРУ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ	59
3.1 Цели и задачи исследования	59
3.2 Выбор исходных данных для исследований	61
3.3 Изменения величины тягового тока по длине рельсовой нити	63
3.4 Асимметрия переменного тягового тока на релейном конце рельсовой цепи, ограниченной изолирующими стыками	67
3.5 Асимметрия тягового тока в однородной рельсовой линии с изолиру- ющими стыками	69
3.6 Асимметрия тягового в однородной рельсовой линии на перегонах с бесстыковыми рельсовыми цепями	83
3.7 Асимметрия тягового тока в неоднородной рельсовой линии	91
3.8 Верификация методики расчёта помех на приёмники сигналов от тя- гового тока	96
3.9 Способы уменьшения влияния асимметрии тягового тока в рельсовых линиях на работу рельсовых цепей и автоматической локомотивной сиг- нализации	100
3.10 Выводы по главе	104
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ	106
4.1 Особенности измерений и контроля электрических параметров рель- совых линий	106
4.2 Способ измерения электрических сопротивлений рельсовых нитей в неоднородных рельсовых линиях	109
4.3 Разработка способов контроля состояния изолирующих стыков	113

4.4 Разработка способов автоматического контроля излома рельсов на участках с электротягой	121
4.5 Выводы по главе	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	132
Приложение А	149
Приложение Б	150
Приложение В	151
Приложение Г	156
Приложение Д	160
Приложение Е	161
Приложение Ж	165
Приложение З	170

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Помехи от тяговых токов в тяговой рельсовой сети электрифицированных железных дорог вызывают сбои в работе рельсовых цепей (РЦ) и автоматической локомотивной сигнализации (АЛС). Это отрицательно сказывается на безопасности и бесперебойности движения поездов, увеличивает психофизиологическую нагрузку на локомотивные бригады. Сбои являются самовосстанавливающимися отказами, поэтому выявление их причин требует привлечения к этим работам высококвалифицированных кадров, отнимает много времени и далеко не всегда приводит к обнаружению наиболее значимых источников помех, вызывающих появление сбоев. В результате принимаемые меры для уменьшения интенсивности рассматриваемых сбоев при значительных затратах материальных и трудовых ресурсов не всегда обеспечивают получение ожидаемого результата.

Это определяется сложностью, многофакторностью и динамичностью процессов зарождения помех от тяговых токов, многообразием их отрицательного воздействия на работу аппаратуры рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Поэтому при достаточно большом количестве выполненных научных исследований и разработанных технических решений необходимый уровень помехоустойчивости этой аппаратуры на электрифицированных участках магистральных дорог не достигнут, особенно на их высокоскоростных и загруженных участках.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в исследование вопросов помехоустойчивости устройств рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации при действии различных помех внесли известные учёные Баранов Л.А., Бестемьянов П.Ф., Брылеев А.М., Дмитриев В.С., Котляренко Н.Ф., Кравцов Ю.А., Леушин В.Б., Лунёв С.А., Переборов А.С., Розенберг Е.Н., Степенский Б.М., Табунщиков А.К., Талалаев В.И., Трофимов Ю.А., Шамапов В.И. и многие другие [9, 13, 14, 18, 19, 20, 25, 44, 45, 51, 54, 81, 104, 111, 118, 120].

Исследованию проблем обеспечения электромагнитной совместимости рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации посвящены работы таких учёных как Бадёр М.П., Бочков К.А., Костроминов А.М., Котельников А.В., Кравцов Ю.А., Лисенков В.М., Пенкин Н.Ф., Шаманов В.И., Шишляков А.П., Щербина Е.Г. и других [11, 19, 21, 42, 43, 53, 104, 111, 115].

Решению данных вопросов посвящены диссертационные работы Антонова А.А., Бакина М.Е., Горенбейна Е.В., Леушина В.Б., Мащенко П.Е., Трофимова Ю.А., Щербины А.Е. и ряда других [6, 12, 26, 50, 57, 82, 114].

Объект исследования – электромагнитная обстановка на участках с электротягой переменного тока, помехозащищённость и помехоустойчивость аппаратуры РЦ и АЛС.

Предмет исследования – способы и методики анализа электромагнитной обстановки в рельсовых линиях на участках с электротягой переменного тока и расчёта распределения тягового тока по рельсовым линиям, способы измерения и контроля электрических параметров элементов в рельсовых линиях, способы повышения помехозащищённости и помехоустойчивости аппаратуры РЦ и АЛС.

Цель и задачи. Цель диссертации – научное обоснование разработанных методов, технических и технологических решений для оценки уровня помех от переменного тягового тока на работу аппаратуры РЦ и АЛС, а также защиты от этих помех.

Поставленная цель достигается решением следующих теоретических и практических задач:

– Анализ существующих методов и технических средств для оценки уровня помех на работу аппаратуры РЦ и АЛС и способов защиты от данных помех.

– Разработка модели рельсовой линии, позволяющей одновременно учитывать неоднородность сопротивлений по длине рельсовых нитей, их взаимную индуктивность и поверхностное сопротивление рельсовой линии.

– Разработка методики математического моделирования распределения тягового тока по рельсовым нитям с одновременным учётом неоднородности их сопро-

тивлений по длине и взаимной индуктивности между рельсовыми нитями, что позволяет проводить анализ распределения гармоник тягового тока по элементам рельсовых линий, оборудованных РЦ любого типа.

– Разработка решения для уменьшения уровня помех от гармоник тягового тока, обладающих широким частотным диапазоном и большим изменением амплитуд во времени, на аппаратуру РЦ и АЛС за счёт компенсации данных помех.

– Разработка способов косвенного измерения продольного и поперечного сопротивлений отрезка рельсовой нити переменному тяговому току в конкретной точке пути, а также автоматического контроля состояния изолирующих стыков.

– Разработка способа автоматического обнаружения излома рельсов, отличающегося от известных ранее использованием тягового тока в рельсовых линиях как информационного сигнала с контролем величины его асимметрии.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Обобщены и проанализированы существующие методы и технические средства для оценки уровня помех на работу аппаратуры РЦ и АЛС и способов защиты от данных помех.

2. Разработана новая модель рельсовой линии, отличающаяся от известных ранее моделей тем, что позволяет одновременно учитывать неоднородность сопротивлений по их длине, взаимную индуктивность между рельсовыми нитями, а также поверхностное сопротивление рельсовой линии.

3. Разработана новая методика математического моделирования распределения переменного тягового тока по элементам рельсовых линий, оборудованных РЦ любого типа, позволяющая провести анализ мешающего влияния на работу аппаратуры РЦ и АЛС помех от переменного тягового тока при разных состояниях рельсовых линий по их электрическим параметрам.

4. Предложено и обосновано новое решение для повышения помехозащищённости приёмников РЦ и АЛС за счёт компенсации гармонических помех, отличающееся тем, что обеспечивает подавление помех, обладающих широким частотным диапазоном и большим изменением амплитуд во времени.

5. Предложены и обоснованы новые способы косвенного измерения продольного и поперечного сопротивлений отрезка рельсовой нити переменному тяговому току в конкретной точке пути, а также автоматического контроля состояния изолирующих стыков.

6. Предложен и обоснован новый способ автоматического обнаружения излома рельсов на участках с электротягой, отличающийся от известных ранее контролем изменения асимметрии тягового тока в рельсовых линиях как информационного сигнала, что обеспечивает повышение своевременности и достоверности информации о проявлении таких происшествий.

Теоретическая и практическая значимость

1. Найденные диапазоны изменения величины и гармонического состава тягового тока в рельсовой линии, а также поперечного и продольного удельных сопротивлений её рельсовых нитей позволили определить требования к методам и техническим средствам, обеспечивающим помехоустойчивость аппаратуры РЦ и АЛС на электрифицированных участках железных дорог с тяжеловесным и/или высокоскоростным движением поездов.

2. Применение разработанной модели рельсовой линии обеспечило возможность одновременно учитывать неоднородность сопротивлений по их длине, взаимную индуктивность между рельсовыми нитями, а также поверхностное сопротивление рельсовой линии.

3. Разработанная методика математического моделирования рельсовых линий как сложных электрических цепей обеспечила возможность количественной оценки распределения переменного тягового тока по элементам рельсовых линий для определения степени влияния их состояния на величину асимметрии его гармоник, а также степени влияния уравнивающих дросселей, устанавливаемых на перегонах, оборудованных тональными бесстыковыми рельсовыми цепями, на уменьшение величины асимметрии тягового тока.

4. Разработка и использование устройства, технически реализующего новое решение, которое позволяет за счёт компенсации гармонических помех в сред-

нем в два раза уменьшить уровень этих помех, по сравнению с серийно выпускаемыми фильтрами, что существенно снизит число сбоев в работе аппаратуры РЦ и АЛС на участках с интенсивным движением тяжеловесных и скоростных поездов.

5. Разработанные способы косвенного измерения продольного и поперечного сопротивлений отрезка рельсовой нити и автоматического контроля состояния изолирующих стыков уменьшают трудоёмкость и повышают качество работ по техническому обслуживанию РЦ.

6. Разработанный способ автоматического обнаружения излома рельсов обеспечивает повышение своевременности и достоверности информации о проявлении таких происшествий на участках с электротягой.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы математического и физического моделирования, численные методы расчётов и анализа, экспериментальные исследования. Для решения поставленных задач применялись теоретические основы электротехники, теория электрических цепей, теория рельсовых цепей, математический анализ, теория передачи сигналов по проводам, теория электрических измерений, теория автоматического контроля, методы обеспечения электромагнитной совместимости, имитационное моделирование. Результаты проверялись с использованием экспериментов в лабораторных условиях, разработанных прикладных программ для ЭВМ, созданных в системе компьютерной алгебры Mathcad 15, и среды виртуального моделирования Multisim 13.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель рельсовой линии, позволяющая одновременно учитывать неоднородность сопротивлений по их длине, взаимную индуктивность между рельсовыми нитями и поверхностное сопротивление рельсовой линии.

2. Методика аналитической оценки электромагнитной обстановки для РЦ и АЛС на участках железных дорог с электротягой переменного тока.

3. Зависимости уровня генерируемых помех от переменного тягового тока на приёмники РЦ и АЛС от состояния рельсовых линий.

4. Решение для уменьшения уровня помех от гармоник тягового тока, действующих на аппаратуру РЦ и АЛС, за счёт компенсации гармонических помех.

5. Способы и технические решения для измерения продольного и поперечного сопротивлений отрезка рельсовой нити, а также автоматического контроля состояния изолирующих стыков при электротяге переменного тока.

6. Способы и технические решения для автоматического обнаружения излома рельсов за счет контроля изменения асимметрии тягового тока в рельсовых линиях как информационного сигнала.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных результатов обусловлена корректностью использования математического аппарата, обоснованностью принятых допущений, подтверждена результатами имитационного моделирования и известными результатами измерений в условиях эксплуатации. Полученные результаты не противоречат исследованиям других авторов.

Результаты, полученные в диссертационной работе, подтверждены актом внедрения, представленным в Приложении А.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XIX Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (Москва, 2018 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки» (Москва, 2019 г.); Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель, 2019, 2020, 2021, 2022 гг.); Молодежном научном форуме студентов и аспирантов транспортных вузов (с международным участием) «Актуальные аспекты и приоритетные направления развития транспортной отрасли» (Санкт-Петербург, 2019 г.); Международной научной конференции «International Transport Scientific Innovation» (Москва, 2021 г.); VI Всероссийской конференции (с международным участием) «Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки» (Москва, 2021 г.); Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы» (Санкт-Петербург, 2021 г.); II Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы» (Москва, 2023 г.), а также на заседаниях кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» в 2020 – 2023 гг.

ГЛАВА 1. ПРОЦЕССЫ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОГО ТОКА НА РАБОТУ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

1.1 Влияние помехоустойчивости рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации на безопасность и бесперебойность движения поездов

Основными требованиями, предъявляемыми к системам интервального регулирования движения поездов (СИР ДП), являются точность определения местоположения подвижного состава и качество передачи данной информации на аппаратуру, управляющую напольными и локомотивными светофорами. Помехоустойчивость таких систем является основой обеспечения безопасности и бесперебойности движения поездов. Критерием помехоустойчивости является интенсивность отказов в работе данных систем.

В случае увеличения интенсивности отказов в работе СИР ДП, возникает потребность в проведении на данном участке оценки электромагнитной обстановки [28]. Знание электромагнитной обстановки также необходимо при оценке влияния количества, скорости движения и/или веса поездов на устойчивость работы данной аппаратуры.

В современных СИР ДП используются следующие технические средства: счётчики осей, евробализы, волоконно-оптические кабели или индуктивные шлейфы [24]. Всё шире применяются спутниковые навигационные системы и цифровые радиоканалы [17, 110, 121, 122, 125, 135]. Однако область применения таких способов – это, прежде всего, участки железных дорог с высокоскоростным движением [24].

На большинстве участков железных дорог мира, в том числе на магистральных и промышленных железных дорогах России РЦ остаются основным источником информации о свободности участков пути и целостности их рельсов, а также индуктивными линиями связи между напольными и локомотивными устройствами

АЛС [74, 124, 126, 127, 136]. Они обеспечивают контроль свободности от подвижного состава участков пути перед поездом, контроль излома рельса и передачу на локомотив этой информации.

При использовании РЦ электрические сигналы передаются по рельсовым линиям, которые, с точки зрения электротехники, представляют собою, по сути, два голых провода с плохой электрической изоляцией между ними и по отношению к земле. Рельсовые линии как линии электрической связи подвержены различным механическим, индуктивным и кондуктивным влияниям. На них могут влиять высоковольтные линии электропередачи, контактные провода, смежные и расположенные параллельно РЦ, линии продольного электроснабжения железнодорожных объектов, магнитные поля при их неравномерном распределении по длине рельсов.

В результате РЦ и АЛС по интенсивности отказов, как устойчивых, так и самовосстанавливающихся (сбоев), являются одним из самых ненадёжных элементов в системах железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), требующих больших затрат на восстановление работоспособности [86]. Это вызывает необходимость их постоянного совершенствования, предъявляет высокие требования к качеству их технического обслуживания, приводит к относительно большим расходам на их эксплуатацию.

Отказы в работе РЦ или АЛС приводят к кратковременному ложному перекрытию показаний соответственно напольных или локомотивных светофоров на запрещающие показания. Сбои вызывают необходимость снижения скорости движения поезда, а ложное включение красной лампы напольного светофора перед непосредственно идущим поездом вынуждает использовать экстренное торможение. В результате увеличивается психофизиологическая нагрузка на поездные бригады, снижается участковая скорость движения с соответствующим уменьшением пропускной способности участков железных дорог, ухудшается безопасность движения поездов. Данные проблемы проявляются не только на магистральных железных дорогах, но и в метрополитене [117, 119].

Наиболее сложна электромагнитная обстановка для аппаратуры РЦ и АЛС на электрифицированных участках железных дорог, где по рельсовым линиям пропускаются как сигнальные, так и тяговые токи [131]. Величины и переменного, и постоянного тяговых токов на два – три порядка больше, чем величина сигнальных токов. Процесс изменения во времени помех является случайным нестационарным, зависящим от действия многих факторов, а уровень и гармонический состав помех может быстро изменяться во времени. Процесс возникновения помех усложняется действием взаимных индуктивностей рельсовых нитей с другими токонесущими линиями, в том числе с другой рельсовой нитью своей рельсовой линии.

В результате на электрифицированных железных дорогах тяговые токи создают мощные помехи, поэтому интенсивность сбоев на них в десятки раз выше, чем при автономной тяге. Постоянный тяговый ток создаёт помехи на чётных гармониках тока промышленной частоты, а переменный – на нечётных гармониках. Увеличение веса, количества и скорости движения поездов приводит к росту числа сбоев.

Количество возможных причин сбоев в работе РЦ и АЛС превышает два десятка [111]. Динамичность процессов образования помех и кратковременность существования сбоев существенно усложняют определение причин их появления. Это определяет трудности исследования процессов изменения состояния электрических параметров элементов рельсовой тяговой сети (РТС) и их влияния на растекание тягового тока по ней, а также трудности разработки и совершенствования методов контроля и диагностики состояния этих элементов.

Проведенные исследования показали, что уровень мешающего влияния тяговых токов в рельсах на работу аппаратуры рельсовых цепей и АЛС зависит, прежде всего, от величины асимметрии сопротивления рельсовых нитей рельсовой линии. Данная асимметрия определяется, главным образом, разностью в скорости роста переходных электрических сопротивлений в стыках рельсов звеньевое пути. Взаимная индуктивность между смежными рельсовыми нитями увеличивает асимметрию тягового тока.

Сложность и многофакторность электромагнитных процессов в рельсовой тяговой сети, влияние на электромагнитную обстановку изменений во времени величины и гармонического состава тяговых токов в сети, внешние влияния от линий электропередачи и линий продольного электроснабжения определяют трудности решения задач по обеспечению требуемого уровня помехоустойчивости работы РЦ и АЛС.

1.2 Тяговая сеть как источник помех

Основной источник помех на участках с электротягой – тяговый ток [43, 44]. По статистическим данным сбоев в работе аппаратуры РЦ и АЛС на участках, электрифицированных на переменном токе, больше в 4 – 5 раз, чем на участках, электрифицированных на постоянном токе [11, 94].

Мешающее действие тягового тока в рельсовой тяговой сети рассматривалось ещё классиками теории РЦ [18, 19]. Увеличение веса, количества и скорости движения поездов обострили актуальность этой проблемы, особенно на перевальных участках, где интенсивность сбоев в работе аппаратуры РЦ и АЛС от действия помех обычно на порядок больше, чем на участках с электротягой постоянного тока. Существенно возрастают при этом потери в поездной работе от рассматриваемых сбоев, и заметно ухудшается безопасность движения поездов [111].

Защита от мешающего действия тяговых токов предусмотрена уже в самом построении схем РЦ и АЛС. По секциям основных обмоток дроссель-трансформаторов (ДТ) тяговый ток течёт во встречном направлении, поэтому при равенстве токов в секциях помех от них на аппаратуру РЦ нет. Подобная защита от мешающего влияния тяговых токов предусмотрена и в локомотивной аппаратуре АЛС, где приёмные локомотивные катушки включаются встречно.

Однако равенство тяговых токов в рельсовых нитях рельсовой линии выполняется не всегда. Асимметрия (разность) тяговых токов в рельсовых нитях рельсовой линии появляется, когда становятся неодинаковыми величины продольных и/или поперечных сопротивлений рельсовых нитей [105].

Под продольным электрическим сопротивлением рельсовой нити понимают суммарное сопротивление для тягового тока и его гармоник сплошных рельсов, проводов в рельсовых стыковых соединителях, тросов дроссельных перемычек, переходных сопротивлений на стыках рельсовых звеньев и в дроссельных перемычках, а также секций основных обмоток ДТ при их наличии в рельсовых цепях. Первопричиной появления асимметрии продольных сопротивлений рельсовых нитей является несимметричное увеличение электрического сопротивления переходных сопротивлений на стыках рельсовых звеньев и в дроссельных перемычках. Эта причина является доминирующей на участках железных дорог со звеньевым путём.

Повышение асимметрии тягового тока и интенсивности сбоев рассматриваемой аппаратуры может возникать и при несимметричном уменьшении сопротивления изолирующих стыков вследствие деградационных процессов в них.

Поперечное сопротивление рельсовой нити – это её сопротивление по отношению к земле. Основной причиной появления асимметрии поперечного сопротивления рельсовой линии является ухудшение состояния или пробой искровых промежутков в цепях заземления опор контактной сети, подключаемых к рельсам. На линиях с железобетонными шпалами асимметрия поперечного сопротивления рельсовой линии может появляться при односторонних ухудшениях состояния их электроизолирующих элементов [111].

Причиной увеличения интенсивности сбоев в работе аппаратуры АЛС при вступлении головного электровоза на рельсовую цепь может быть и недопустимо большое затухание сигнального тока в рельсовой линии из-за роста её продольного сопротивления и/или уменьшения поперечного сопротивления.

Неодинаковость изменения по длине рельсовых нитей сопротивлений токопроводящих стыков и сопротивлений рельсов по отношению к земле превращает рельсовую линию в неоднородную электрическую линию. Если по длине рельсовой линии происходит неравномерная утечка тягового тока из рельсов в землю и величина этого тока меняется по длине рельсовой линии, то по длине меняется и степень влияния взаимных индуктивностей рельсовой нити с другими токоведущими линиями на асимметрию переменного тягового тока [21].

Уровень помех на аппаратуру от тягового тока в рельсовой линии возрастает с увеличением абсолютного значения асимметрии $\Delta \dot{I}_T$ тяговых токов \dot{I}_{T1} и \dot{I}_{T2} в рельсовых нитях в местах подключения к рельсам аппаратуры РЦ или под приёмными локомотивными катушками АЛС [108]:

$$\Delta \dot{I}_T = |\dot{I}_{T1} - \dot{I}_{T2}|. \quad (1.1)$$

Относительное значение этой асимметрии характеризуют коэффициентом асимметрии тягового тока [108]:

$$k_{AI} = \frac{|\dot{I}_{T1} - \dot{I}_{T2}|}{\dot{I}_{T1} + \dot{I}_{T2}} = \frac{\Delta \dot{I}_T}{\dot{I}_T}. \quad (1.2)$$

Отсюда

$$\Delta \dot{I}_T = k_{AI} \dot{I}_T, \quad (1.3)$$

т.е. при одном и том же численном значении коэффициента асимметрии тягового тока абсолютное значение его разности $\Delta \dot{I}_T$ определяется величиной тягового тока в рельсовой линии. Поэтому нормировать допускаемый уровень помех по величине коэффициента асимметрии тягового тока нельзя.

Относительную разность сопротивлений первой Z_{PH1} и второй Z_{PH2} рельсовых нитей рельсовой линии оценивают с использованием коэффициента их асимметрии [108]

$$k_{AZ} = \frac{|Z_{PH1} - Z_{PH2}|}{Z_{PH1} + Z_{PH2}}. \quad (1.4)$$

Формулы для вычисления величин этих сопротивлений для рельсовых цепей, ограниченных двумя ДТ, с учетом физических и электрохимических процессов,

происходящих в электропроводящих и изолирующих элементах рельсовых линий, можно представить в следующем виде [89]

$$Z_{PH1} = z_p l + \sum_k \frac{\dot{I}_{Tm}}{\dot{I}_{T1}} z_{M1m} l + \sum_p \frac{\dot{I}_{Kj}}{\dot{I}_{T1}} z_{M1Kj} l + \sum \frac{\dot{I}_{ВЛ}}{\dot{I}_{T1}} z_{M1B} l + \sum_q Z_{TC1i} + Z_{ДП11} + Z_{ДП12} + 0,25Z_{ДТ}; \quad (1.5)$$

$$Z_{PH2} = z_p l + \sum_k \frac{\dot{I}_{Tm}}{\dot{I}_{T2}} z_{M2m} l + \sum_p \frac{\dot{I}_{Kj}}{\dot{I}_{T2}} z_{M2Kj} l + \sum \frac{\dot{I}_{ВЛ}}{\dot{I}_{T2}} z_{M2B} l + \sum_q Z_{TC2i} + Z_{ДП21} + Z_{ДП22} + 0,25Z_{ДТ}, \quad (1.6)$$

где l – длина рельсовой цепи;

z_p – удельное сопротивление сплошных рельсов;

$\sum_k \frac{\dot{I}_{Tm} z_{M1m}}{\dot{I}_{T1}}$; $\sum_k \frac{\dot{I}_{Tm} z_{M2m}}{\dot{I}_{T2}}$ – суммы сопротивлений взаимной индуктивности первой и второй рельсовых нитей рассматриваемой рельсовой линии с другими рельсовыми нитями;

z_{M1m} ; z_{M2m} – удельные сопротивления взаимной индуктивности между рельсовыми нитями;

$\sum_p \frac{\dot{I}_{Kj} z_{M1Kj}}{\dot{I}_{T1}}$; $\sum_p \frac{\dot{I}_{Kj} z_{M2Kj}}{\dot{I}_{T2}}$ – суммы сопротивлений взаимной индуктивности первой и второй рельсовых нитей рассматриваемой рельсовой линии с контактными проводами;

z_{M1Kj} ; z_{M2Kj} – удельные сопротивления взаимной индуктивности рельсовых нитей с контактными проводами;

$\sum \frac{\dot{I}_{ВЛ} z_{M1B}}{\dot{I}_{T1}}$; $\sum \frac{\dot{I}_{ВЛ} z_{M2B}}{\dot{I}_{T2}}$ – суммы сопротивлений взаимной индуктивности первой и второй рельсовых нитей рассматриваемой рельсовой линии с эквивалентным средним проводом высоковольтной линии электроснабжения;

$z_{M1B}; z_{M2B}$ – удельные сопротивления взаимной индуктивности рельсовых нитей с эквивалентным средним проводом высоковольтной линии электроснабжения;

$\sum_i Z_{TC1i}; \sum_i Z_{TC2i}$ – суммы сопротивлений токопроводящих стыков соответственно в первой и второй рельсовых нитях;

$Z_{ДП11}; Z_{ДП21}$ – сопротивления дроссельных перемычек в первой рельсовой нити;

$Z_{ДП21}; Z_{ДП22}$ – сопротивления дроссельных перемычек во второй рельсовой нити;

$Z_{ДТ}$ – сопротивление основной обмотки ДТ;

$\dot{I}_{T1}; \dot{I}_{T2}$ – тяговые токи соответственно в первой и второй рельсовых нитях;

\dot{I}_{Tm} – тяговый ток в m -й рельсовой нити;

\dot{I}_{Kj} – тяговый ток в j -м контактном проводе;

$\dot{I}_{ВЛ}$ – ток в эквивалентном среднем проводе высоковольтной линии электро-снабжения;

k – количество рельсовых нитей, не считая рассматриваемой;

p – количество контактных проводов;

q – количество токопроводящих стыков.

Возникновение в рельсовой цепи разности между суммарными сопротивлениями токопроводящих стыков $\left| \sum_q Z_{TC1i} - \sum_q Z_{TC2i} \right|$ вызывает появление асимметрии тягового тока в рельсовых нитях. Вследствие действия взаимной индуктивности между рассматриваемыми рельсовыми нитями $\left| \sum_k \dot{I}_{T2} z_{M1m} / \dot{I}_{T1} - \sum_k \dot{I}_{T1} z_{M1m} / \dot{I}_{T2} \right|$ заметно увеличивается асимметрия тягового тока [120, 133]. Величина удельного сопротивления взаимной индуктивности между проводами обратно пропорциональна расстоянию между ними [18], поэтому взаимные индуктивности между рельсовыми нитями могут вызывать увеличение коэффициента асимметрии переменного тягового тока в два раза [18].

Действие взаимной индуктивности рельсовой нити с другими токонесущими линиями уменьшается по мере увеличения расстояния между ними. Поэтому третий и четвертый члены формул (1.5) и (1.6) не оказывают такого заметного влияния на величину коэффициента асимметрии переменного тягового тока [89].

Разность сопротивлений дроссельных перемычек в рельсовых нитях может заметно сказываться на величине коэффициента асимметрии тягового тока в коротких РЦ и при приближении головы поезда к выходному концу РЦ.

Удельное сопротивление изоляции рельсовых нитей может меняться от 0,5 до 18,0 Ом·км [41]. Входное сопротивление цепи заземления каждой опоры или сооружения должно быть не менее 100 Ом, а при пробое искрового промежутка – не менее 10 Ом [37].

Абсолютная величина удельного продольного сопротивления рельсовых нитей с рельсами Р65 при температуре +20 °С на частоте первой гармоники тягового тока 50 Гц может меняться в пределах 0,40 – 0,45 Ом/км в зависимости от состояния стыковых соединений рельсовых звеньев. При изменении температуры рельсов и/или величины тока в них значения сопротивлений рельсовых нитей меняются.

Изменение активного сопротивления рельсов при изменении величины тока, протекающего по ним, можно определить с использованием зависимости относительной магнитной проницаемости рельсовой стали от напряженности магнитного поля на поверхности [56]. В расчётах начальная магнитная проницаемость принимается равной 100, а при величине тока 700 А в одной рельсовой нити с рельсами типа Р65 составляет 450 [56]. При изменении величины тока в указанном диапазоне данную зависимость можно считать линейной [104] и находить значение относительной магнитной проницаемости рельсовой стали по следующей формуле:

$$\mu_{er} = 100 + 0,35 \frac{I_{PH}}{u}, \quad (1.7)$$

где μ_{er} – относительная магнитная проницаемость рельсовой стали;

I_{PH} – величина тока в рельсовой нити, А;

u – периметр поперечного сечения рельса, м.

Зная величину относительной магнитной проницаемости рельсовой стали, численное значение активного сопротивления ферромагнитного проводника можно найти по формуле Неймана [8, 19, 104]:

$$R_p = \frac{l}{u} \sqrt{\mu_0 \mu_{er} \rho \omega}, \text{ Ом}, \quad (1.8)$$

где l – длина проводника, м;

u – периметр поперечного сечения, м;

$\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

μ_{er} – относительная магнитная проницаемость рельсовой стали;

ρ – удельное сопротивление рельсовой стали, Ом·м;

ω – угловая частота, рад/с.

Если в рельсовой линии происходит утечка тягового тока из рельсов в землю, то сопротивления рельсовых нитей Z_{PH1} и Z_{PH2} становятся функциями тяговых токов в них \dot{I}_{T1} и \dot{I}_{T2} , величины которых при наличии утечек через цепи заземления опор контактной сети изменяются различным образом по длине рельсовой линии. В этом случае величина удельного сопротивления рельсов тоже становится переменной по длине рельсовых нитей. Асимметрия тягового тока в секциях основных обмоток ДТ может заметно менять их сопротивление.

Рельсовые нити представляют собой электрически длинную линию с распределенными параметрами. Тогда величины тягового тока в произвольной точке и в начале рельсовой нити связаны следующим соотношением [39]:

$$\dot{I}_{Ti} = \dot{I}_{TH} e^{-\gamma l}, \quad (1.9)$$

где \dot{I}_{Ti} – тяговый ток в произвольной точке рельсовой нити;

\dot{I}_{TH} – тяговый ток в начале рельсовой нити;

γ – коэффициент распространения волны;

l – длина отрезка рельсовой нити между её началом и рассматриваемой точкой.

Если продольное и поперечное сопротивления рельсовой нити в пределах рассматриваемого отрезка не изменяются, то коэффициент распространения волны рассчитывается по формуле [39]:

$$\gamma = \sqrt{\frac{r_{P3}}{z_{ПР}}}, \quad (1.10)$$

где r_{P3} – удельное сопротивление изоляции рельсовой нити по отношению к земле;

$z_{ПР}$ – удельное продольное сопротивление рельсовой нити, включающее сопротивление самой рельсовой нити и магнитное сопротивление.

С изменением температуры окружающей среды активное сопротивление рельсов тоже меняется. При изменении температуры, например, от $+20^{\circ}\text{C}$ до -30°C сопротивление рельсов уменьшается в 1,3 раза.

Зависимость величины активного сопротивления рельсов от температуры T определяется следующим выражением [101]

$$|R_{Pi}| = |R_{P20}| \left[1 + \alpha_t (T - 20^{\circ}\text{C}) \right], \quad (1.11)$$

где $|R_{P20}|$ – активное сопротивление рельсовой нити при температуре $+20^{\circ}\text{C}$;

$\alpha_t = 0,00461^{\circ}\text{C}^{-1}$ – температурный коэффициент сопротивления [101].

График найденных с использованием формул (1.7 – 1.11) количественных зависимостей модуля удельного электрического сопротивления рельсовых нитей $|z_{PH}|$ с рельсами типа Р65 в диапазонах изменения температур от $+40^{\circ}\text{C}$ до -40°C и величины протекающего по ним тягового тока частотой 50 Гц до 400 А приведен на рисунке 1.1 [30]. Верхний предел величины протекающего по рельсовым нитям

тягового тока принят найденному его значению по результатам измерений в рельсовых нитях на горных участках Транссибирской магистрали в зонах тяговой рельсовой сети, примыкающих к тяговым подстанциям [111].

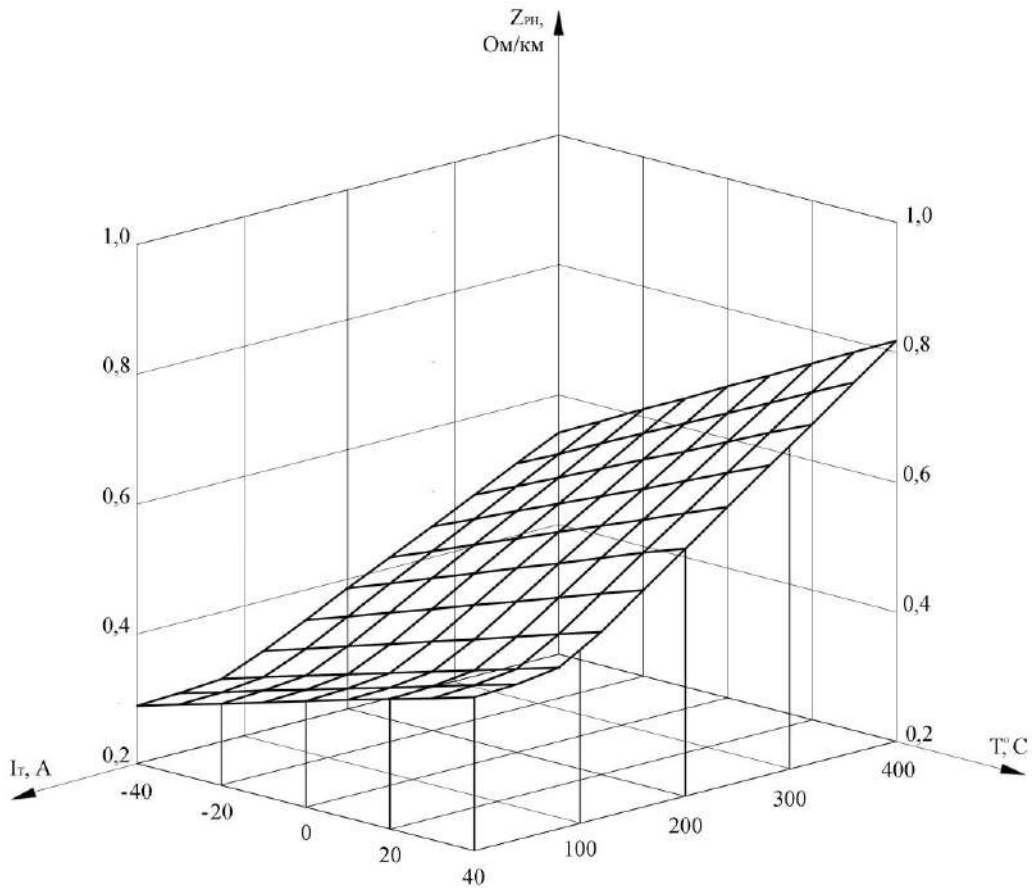


Рисунок 1.1 – Изменение модуля удельного сопротивления рельсовых нитей

Из рисунка 1.1 видно, что при одновременном изменении величины тягового тока и температуры рельсов в рассматриваемых пределах величина удельного электрического сопротивления рельсовых нитей изменяется от 0,29 до 0,82 Ом/км, т.е. в 2,83 раза.

Следовательно, величина асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в рельсовой линии и соответствующая величина асимметрии переменного тягового тока в ней зависят не только от состояния токопроводящих элементов рельсовых линий и величины взаимной индуктивности рельсовых нитей, но и от температуры рельсов и от величины и частоты тяговых токов в них, в контактном проводе и в

высоковольтных линиях электроснабжения, размещаемых на опорах контактной сети. Это усложняет проведение измерений для выявления причин повышения асимметрии тягового тока в рельсовых линиях, обработку полученных данных и их экстраполяцию на другие условия эксплуатации рельсовой тяговой сети.

Величины продольных и поперечных сопротивлений рельсовых нитей распределяются по длине рельсовой линии случайным образом, поэтому по длине рельсовых нитей в рельсовой линии они распределены неодинаково. В результате асимметрия сопротивлений рельсовой линии и определяемая ей асимметрия тягового тока меняются стохастически.

Асимметрия тягового тока в месте подключения к рельсам приёмника РЦ зависит от усредненной асимметрии продольного и поперечного сопротивлений по всей длине отрезка рельсовой линии между питающим и релейным концами. В рельсовых цепях сопротивления секций основных обмоток ДТ, установленных на концах РЦ, являются балластными сопротивлениями, поэтому асимметрия сопротивлений рельсовых нитей уменьшается.

Устойчивость работы системы АЛС зависит от распределения тягового тока в рельсовых нитях под приёмными локомотивными катушками, которое меняется при изменении асимметрии входных сопротивлений этих нитей по мере движения поезда. Величина асимметрии тягового тока под катушками также обусловлена соотношением продольного и поперечного сопротивлений рельсовой нити в конкретной точке пути. Например, при неизменном сопротивлении рельсов по отношению к земле и приближении головы поезда к рельсовым стыкам с повышенным переходным сопротивлением утечка тягового тока из рельсов в землю возрастает.

1.3 Анализ статистических данных по влиянию тягового тока на работу рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации

РЦ и АЛС по интенсивности сбоев являются одним из самых ненадёжных элементов в системах ЖАТ. Это объясняется тяжёлыми условиями их эксплуатации вследствие действия постоянных динамических нагрузок от движения поездов,

изменений погодных условий, засорения балласта токопроводящими материалами [36, 42]. Параметр потока отказов РЦ для автоблокировки на ряде участков железных дорог достигает $40 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, для электрической централизации – $55 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ [96].

На электрифицированных участках одной из наиболее характерных причин отказов РЦ являются ухудшение состояния элементов рельсовых линий, по которым протекает тяговый ток [29, 111].

На рисунках 1.2 – 1.4 показаны данные комплексного анализа эксплуатационной деятельности хозяйства автоматики и телемеханики за 2020 год, предоставленные Управлением автоматики и телемеханики Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД».

Число отказов рельсовых линий по годам показано на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Отказы рельсовых линий по годам

Наибольшее количество отказов допущено службой пути, на долю которого приходится 77,8 % от общего числа отказов, на втором месте расположено хозяйство СЦБ, на долю которого приходится 12,1 % отказов рельсовых линий.

Был проведен анализ отказов рельсовых линий по всем хозяйствам по дистанциям (рисунок 1.3).

По результатам выполненного анализа факторов, влияющих на состояние рельсовой линии, составлена диаграмма причин отказов рельсовых линий (рисунок 1.4).

Отказы рельсовых линий по всем хозяйствам по ДИ



Рисунок 1.3 – Отказы рельсовых линий по всем хозяйствам по ДИ

Из рисунка 1.4 видно, что основными причинами отказов были неисправность изолирующих стыков, закорачивание рельсовой линии, а также отсутствие или неисправность стыковых соединителей.

Причины отказов рельсовых линий по всем хозяйствам в 2020 году

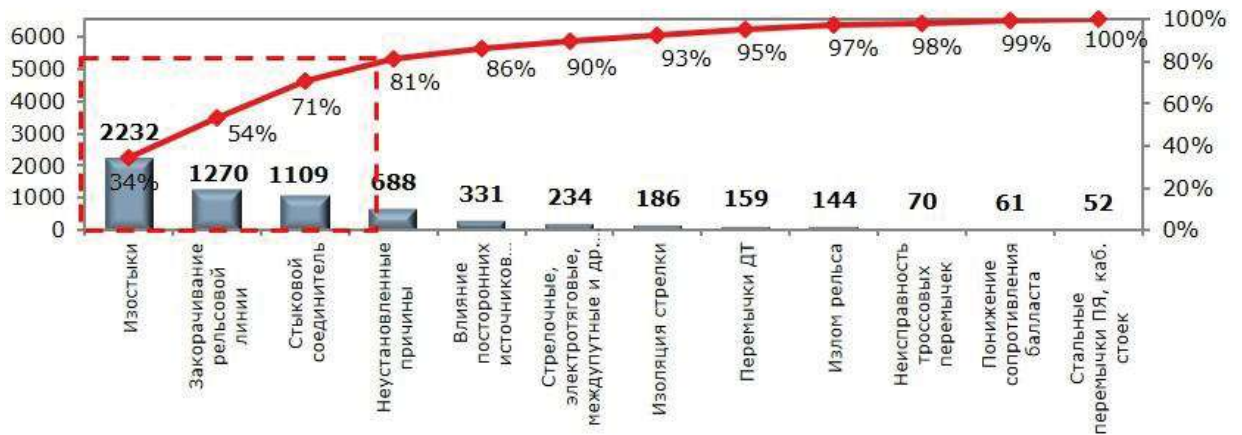


Рисунок 1.4 – Причины отказов рельсовых линий по всем хозяйствам в 2020 году

Рост величины тягового тока в рельсовой линии приводит к увеличению абсолютного значения асимметрии этого тока при неизменной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей. А значит, повышается и уровень помех от тягового тока на аппаратуру РЦ и АЛС.

Следует учитывать, что ЭДС помех от гармоник тягового тока зависит от её частоты [128]. Поскольку фильтры, используемые в аппаратуре РЦ и АЛС, только ослабляют гармонические составляющие помех, но не могут полностью их подавить, гармонический состав тягового тока также влияет на помехоустойчивость работы РЦ и АЛС.

1.4 Анализ научных исследований влияния тягового тока на работу рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации

Проблеме электромагнитной совместимости систем ЖАТ с системой энергоснабжения посвящено много работ. Наиболее интересными в этой области являются [11, 33, 34, 83, 104, 111]. Частным случаем этой проблемы является влияние тягового тока в рельсах на аппаратуру РЦ и АЛС [49, 53, 58, 104, 111, 112]. Тяговые токи оказывают мешающее влияние на данные устройства, когда данные токи в первой и второй рельсовых нитях не одинаковы в месте подключения аппаратуры РЦ или под катушками АЛС, поэтому исследование причин появления их асимметрии является актуальной задачей.

Разработаны способы измерения, контроля и диагностики в условиях эксплуатации элементов рельсовых нитей, а также устройства для их реализации [87, 91, 99]. Сложность здесь определяется тем, что величина переходных сопротивлений в рельсовых стыках не должна превышать несколько миллиОм, поэтому требуется использовать методы неразрушающего контроля. Разработаны также способы повышения качества фильтрации помех в путевых приёмниках рельсовых цепей и локомотивных приёмниках АЛС [69, 70].

Проведенные исследования позволили разработать меры по продлению сроков службы рельсовых стыковых приварных соединителей [100, 106, 123]. Предложенный переход на несущую сигнальную частоту 75 Гц в кодовых РЦ исключает влияние неравномерной продольной намагниченности рельсов на работу РЦ и АЛС на участках с электротягой переменного тока после капитального ремонта пути [23, 73].

По результатам комплекса исследований была создана система АЛС-ЕН [52], превосходящая АЛСН по ряду эксплуатационных показателей, однако АЛСН до сих пор широко применяется по всей сети железных дорог (порядка 67 тысяч километров) [72].

В марковской модели импульсных помех от постоянного тягового тока в рельсовых линиях [10, 116] все параметры получены при анализе статистических данных, носят случайный характер, за их значения приняты математические ожидания в анализируемых выборках помех, соответствующих различным видам переключений контроллера машиниста.

Известен метод контроля изменения условий электромагнитной совместимости на основе оценки статистических характеристик электромагнитной обстановки в местах эксплуатации путевых устройств рельсовых цепей [13]. Данный метод оценки изменения электромагнитной обстановки может быть использован в местах эксплуатации путевых устройств систем обеспечения безопасности движения поездов при внедрении нового электрического подвижного состава.

Известна имитационная модель кодового сигнала в СИР ДП на основе РЦ [72]. Для имитации влияния рельсовой линии на кодовый сигнал в данной модели используется алгоритм цифрового фильтра Баттерворта, что пригодно только при автономной тяге. Для непрерывной оценки состояния рельсовой тяговой сети в условиях организации тяжеловесного движения используется также аппарат конформных отображений [54]. Данный способ позволяет визуализировать полученные результаты, однако расчёты по этой методике достаточно сложны и для неоднородных рельсовых линий не всегда обеспечивают требуемую точность.

Получено дифференциальное уравнение второго порядка, решение которого позволяет находить выходной сигнал для ситуации, когда на входе присутствуют информационный сигнал и помеха с частотой кратной частоте информационного сигнала [55].

Установлено, что нормирование токов, создающих помехи, по абсолютному значению асимметрии тягового тока корректнее, чем по соотношению «информационный сигнал / сигнал помехи» [128].

В настоящее время на высоком уровне разработана теория РЦ [19, 20, 44], поэтому естественным является применение данной теории для расчёта помех тягового тока. В классической теории РЦ для определения условий работы приёмников РЦ и АЛС, достаточно знать величины сигнальных токов в этих приёмниках и сигнальных напряжений на питающих концах РЦ. При расчётах РЦ она представляется пассивным четырёхполюсником типа A [35].

На основе теории РЦ была разработана методика расчёта помех от гармонических составляющих тягового тока на приёмники сигналов РЦ и АЛС, в которой использованы дифференциальные уравнения, описывающие электрические процессы в рельсовых линиях с учётом влияния взаимных индуктивностей [48]. С использованием данной методики получено математическое описание для расчёта влияния гармоник тягового тока на различные виды РЦ и исследования ЭМС РЦ и электроподвижного состава с полупроводниковыми преобразователями [4, 7]. Разработана также физическая модель для экспериментального исследования при воздействии тягового тока в рельсах на работу РЦ [5].

Было показано, что требуемая ЭМС может быть достигнута за счёт применения современных методов обработки сигнала в путевом приёмнике – нелинейной и спектральной обработки амплитудно-манипулированного сигнала [46, 47].

Стоит отметить, что полученные аналитические выражения требуют достаточно сложного определения постоянных интегрирования, что не всегда является простой задачей, хотя они вполне применимы в инженерной практике с использованием ЭВМ.

Однако в данной теории при расчётах используются усредненные значения продольного и поперечного сопротивлений отрезка рельсовой линии. При этом варьирование этих величин по длине рельсовых линий не учитывается, что приводит к определённым трудностям при расчёте распределения тягового тока в неоднородной рельсовой линии с использованием данной методики.

Представление рельсовой линии в виде шестиполюсника позволяет находить величины утечек тока из каждой рельсовой нити в землю [78]. Однако сложности с учётом неоднородностей рельсовой линии при этом не устраняются.

Анализ процесса растекания тягового тока по длине неоднородной рельсовой линии удобно проводить, разделив её на отрезки, по длине которых продольные и поперечные сопротивления рельсовых нитей изменяются относительно слабо [103]. Данные отрезки моделируются с использованием шестиполюсников – параллельного соединения двух трёхполюсников (рисунок 1.5), т.е. Т-образных схем замещения [16]. Рельсовая линия представляется как каскадное соединение таких шестиполюсников [98].

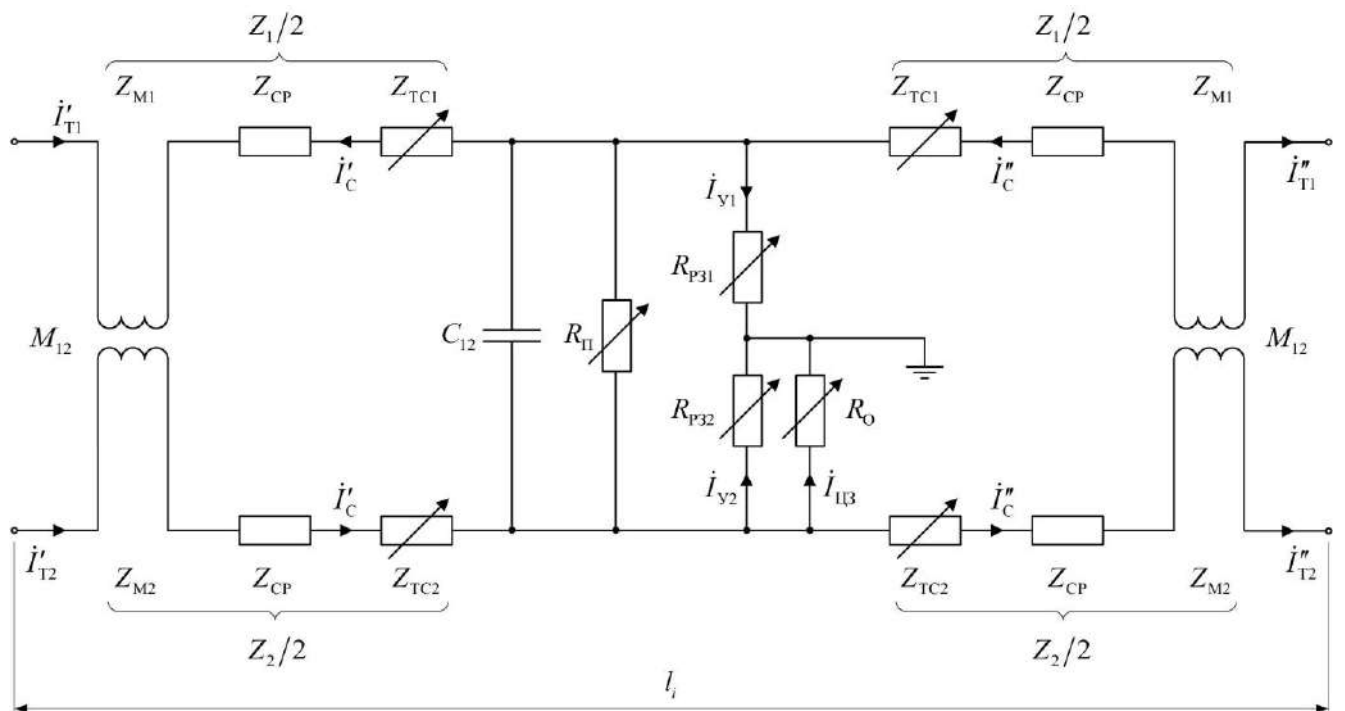


Рисунок 1.5 – Модель отрезка рельсовой линии

В каждой половине трёхполюсника длиной l_i в качестве продольного сопротивления отрезков рельсовых нитей учитываются величины сопротивлений отрезков рельсов Z_{CP} , сопротивления их токопроводящих стыков Z_{TC1} и Z_{TC2} , а также магнитные сопротивления Z_{M1} и Z_{M2} . В качестве поперечного сопротивления рельсовых нитей учитываются сопротивления рельсовых нитей по отношению к земле R_{31} и R_{32} , а также сопротивления цепей заземления опор R_O , подключаемых к рельсам. При необходимости учитываются ёмкость рельсовой линии C_{12} и поверхност-

ное сопротивление R_{Π} . В качестве поверхностного сопротивления может учитываться и сопротивление дросселей, устанавливаемых для уравнивания тяговых токов в рельсовых нитях.

На схеме сигнальный ток в начале рельсовой линии обозначен \dot{I}'_C а в конце \dot{I}''_C . Тяговые токи в началах рельсовых нитей обозначены как \dot{I}'_{T1} и \dot{I}'_{T2} , а в концах \dot{I}''_{T1} и \dot{I}''_{T2} . Утечка тяговых токов из рельсовых нитей в землю обозначена \dot{I}_{Y1} и \dot{I}_{Y2} а утечка тягового тока через цепи заземления $\dot{I}_{ЦЗ}$.

При таком представлении отрезков рельсовой линии в виде последовательно-параллельного соединения её элементов с сосредоточенными параметрами необходимо учитывать требуемую точность расчётов и/или моделирования [92]. Предельно допускаемые длины отрезков рельсовых нитей при погрешности 5% от замены рельсовой линии как электрической линии с распределёнными параметрами трёхполюсником можно рассчитывать, с учетом [35], по формуле

$$l_{\max} \leq \sqrt{0,3} \frac{r_{P3}}{|z_{\Pi P}|}, \quad (1.10)$$

где r_{P3} – удельное поперечное сопротивление рельсовой нити (т.е. её сопротивление по отношению к земле);

$z_{\Pi P}$ – удельное продольное сопротивление рельсовой нити, включающее сопротивление самой рельсовой нити и магнитное сопротивление.

Предельно допускаемые длины отрезков укорачиваются с уменьшением величины удельного поперечного сопротивления рельсовых нитей и/или с ростом значений их продольных сопротивлений, которые в свою очередь увеличиваются при возрастании номера гармоники тягового тока [59].

Найденные величины предельно допустимых длин трёхполюсников с рельсами типа Р65 при их использовании для замены рельсовых нитей с распределёнными параметрами для различных значений удельных сопротивлений рельсов по

отношению к земле и частотах тягового тока и приведены в Приложении Б (таблица Б.1).

Более наглядны построенные в логарифмическом масштабе графики зависимости предельно допустимой длины трёхполюсников от частоты гармоники тягового тока с обеспечением точности расчётов и моделирования не хуже 5% (рисунок 1.6).

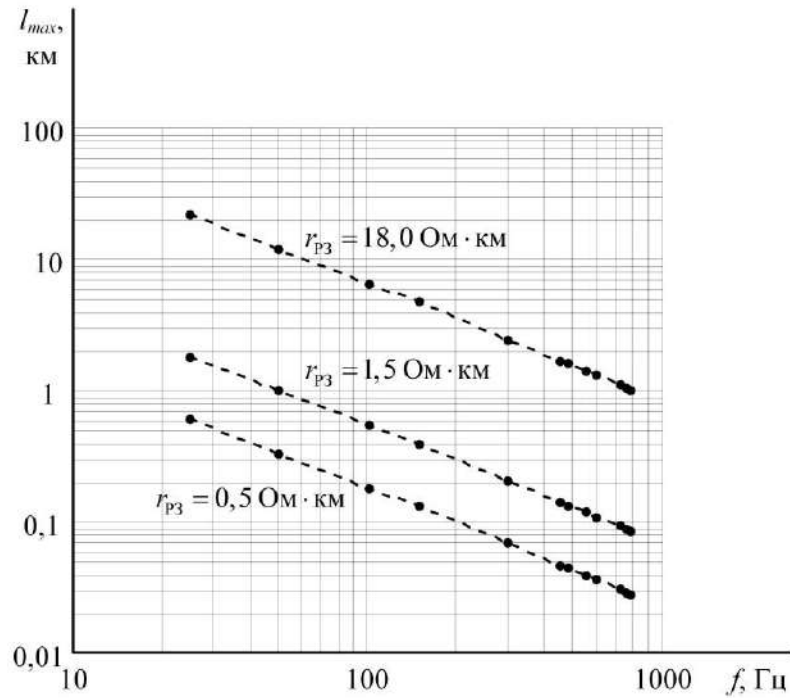


Рисунок 1.6 – Предельно допустимая длина отрезков рельсовой линии в зависимости от частоты гармоники тягового тока

При удельном поперечном сопротивлении рельсов 0,5 Ом·км и делении рельсовых нитей на отрезки длиной меньше 333 м погрешность расчётов на частоте 50 Гц не превышает 5 %. При таком же поперечном сопротивлении и частоте 150 Гц длина отрезка должна быть не больше 130 м, а на частоте 450 Гц – 46 м. При удельном поперечном сопротивлении рельсов 18,0 Ом·км длина отрезков 1000 м обеспечивает погрешность расчётов 5 % на любой частоте. Увеличение точности моделирования до 1% требует уменьшения предельных длин в 2,24 раза.

Величины тяговых токов, втекающих в отрезки рельсовых нитей в начале РЦ или под катушками АЛС, обратно пропорциональны входным сопротивлениям

этих отрезков. При представлении отрезков рельсовых нитей трёхполюсниками со схемами замещения Кауэра [40] был получен ряд результатов по оценке уровня помех от переменного тягового тока на приёмники АЛС [85, 92, 102]. Величины входных сопротивлений отрезков рельсовых нитей при этом вычислялись с использованием непрерывной (цепной) дроби. Однако в расчётах по такой методике сложно учитывать взаимную индуктивность между этими нитями. Также методика не даёт возможность расчёта токов на концах отрезков рельсовых нитей, что делает её мало пригодной для оценки помех на аппаратуру РЦ.

Было показано, что из-за действия взаимной индуктивности рельсовых нитей процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии обладает своеобразной положительной обратной связью [129, 134]. Это обеспечило возможность получить зависимость асимметрии тягового тока от величины асимметрии сопротивления рельсовых нитей [133]. Данная зависимость была использована для учёта влияния взаимной индуктивности рельсовых нитей при вычислении тягового тока в схеме замещения неоднородной рельсовой линии на основе соединения трёхполюсников [108]. На основе разработанной методики написана программа для расчёта помех от тягового тока на ЭВМ [76].

Однако данную методику затруднительно использовать для расчёта тягового тока в рельсовой линии с бесстыковыми рельсовыми цепями, оборудованными уравнивающими дросселями.

Выполненный анализ научных исследований в области ЭМС РЦ и АЛС с рельсовой тяговой сетью (РТС) показал, что многие вопросы, в том числе процесс растекания тягового тока на перегонах, оборудованных бесстыковыми рельсовыми цепями недостаточно изучены. Кроме того, при использовании известных математических моделей рельсовой линии РТС возникают определённые трудности с расчётом помех от тягового тока на РЦ и АЛС с одновременным учётом неоднородности рельсовой линии и влияния взаимной индуктивности рельсовых нитей.

1.5 Выводы по главе

1. Проведён анализ причин возникновения помех от тягового тока и статистических данных по их влиянию на РЦ и АЛС, показавший необходимость разработки новых способов повышения помехоустойчивости аппаратуры РЦ и АЛС при действии помех.

2. Определён диапазон изменения поперечного и продольного удельных сопротивлений рельсовых нитей. Построен график зависимости удельного сопротивления рельсовых нитей от температуры рельсов и величины тягового тока, протекающего по ним.

3. Установлено, что известные математические модели РТС и методики моделирования не позволяют рассчитывать токи помех на РЦ и АЛС с одновременным учётом неоднородности сопротивлений рельсовой линии по длине, её поверхностного сопротивления и влияния взаимной индуктивности рельсовых нитей.

4. Найдено, что недостаточно исследован процесс растекания тягового тока в рельсовых линиях на перегонах, оборудованных автоблокировкой с бесстыковыми тональными рельсовыми цепями.

5. Разработана модель отрезка рельсовой линии, которая позволяет одновременно учесть неоднородности продольных и поперечных сопротивлений данного отрезка, влияние взаимной индуктивности рельсовых нитей, а также поверхностное сопротивление.

6. Определены удовлетворяющие требуемой точности расчётов и моделирования предельно допустимые длины отрезков рельсовых нитей рельсовой линии с распределёнными параметрами, моделируемых трёхполосниками с сосредоточенными параметрами (Т-образными схемами замещения). Построен график зависимости предельно допустимой по требованиям обеспечения необходимой точности расчётов длины трёхполосников от частоты гармоники тягового тока при различных поперечных сопротивлениях рельсов.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОМЕХ ОТ ТЯГОВОГО ТОКА В НЕОДНОРОДНОЙ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ НА АППАРАТУРУ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

2.1 Схема замещения тяговой рельсовой линии

Уровень помех от тягового тока на аппаратуру РЦ и АЛС на участках железных дорог с электротягой определяется, прежде всего, величиной асимметрии тягового тока в рельсах в местах подключения к ним аппаратуры РЦ и под катушками АЛС [8].

Для моделирования процесса растекания тягового тока по рельсовым нитям используется схема замещения рельсовой линии РТС, в которой двухпроводная рельсовая линия представляется как две однопроводные линии [107]. Схема замещения рельсовой линии требуемой длины представляется как каскадное соединение шестиполюсников (рисунок 1.5), моделирующих отрезки рельсовых линий [107]. Чтобы не учитывать распределённость параметров трёхполюсников, рельсовая линия делится на отрезки такой длины, при которой продольные и поперечные сопротивления в пределах каждого отрезка изменяются относительно слабо [103]. При таком представлении отрезков рельсовой линии в виде последовательно-параллельного соединения её элементов с сосредоточенными параметрами необходимо учитывать требуемую точность расчётов и/или моделирования.

В РЦ, ограниченной изолирующими стыками с ДТ, асимметрия тягового тока изменяется в её пределах независимо от состояния рельсовых линий в других РЦ [111]. Следовательно, для расчёта помех от тягового тока в такой РЦ, достаточно смоделировать процесс растекания тягового тока по рельсовым нитям только одной РЦ.

С учётом вышеописанного для моделирования разработана эквивалентная схема замещения тяговой рельсовой линии, оборудованной РЦ с ДТ, к концу которой подключена отсасывающая линия тяговой подстанции (рисунок 2.1).

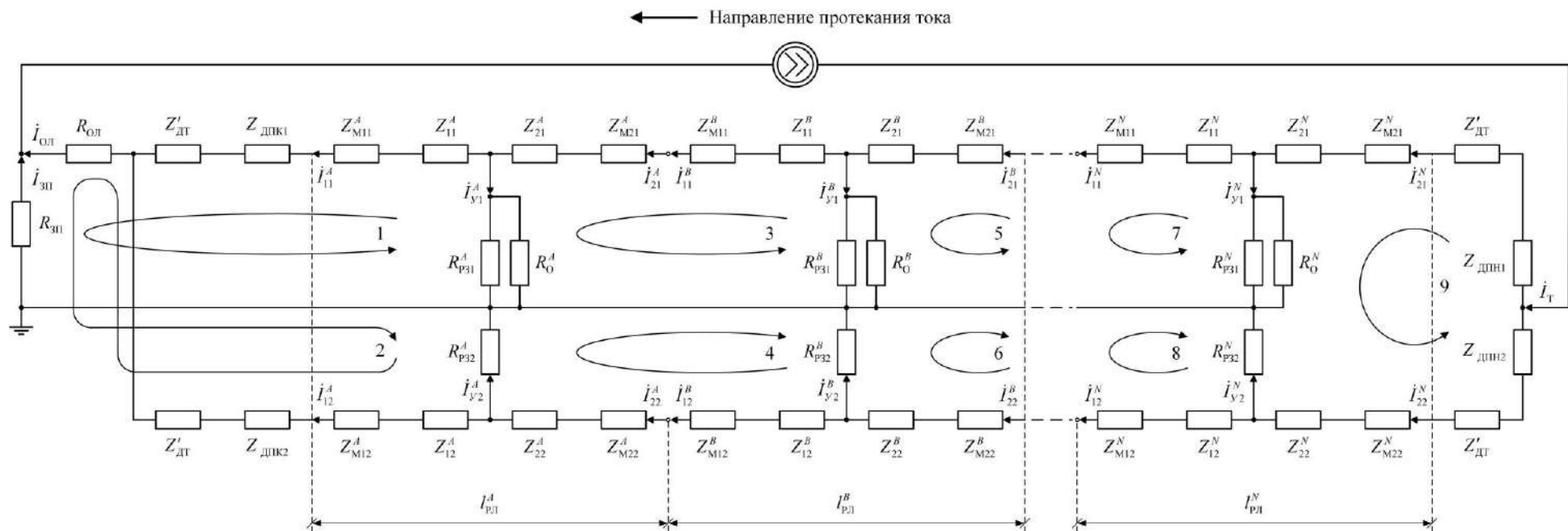


Рисунок 2.1 – Модель рельсовой линии, оборудованной рельсовой цепью в условиях нормального режима её работы

Отрезки рельсовой линии обозначены латинскими прописными буквами. Точки, в которые втекают тяговые токи, считаются началами отрезков рельсовых нитей, а точки, из которых данные токи вытекают, – концами.

На рисунке приняты следующие условные обозначения:

$R_{\text{ОЛ}}$ – сопротивление отсасывающей линии тяговой подстанции;

$R_{\text{ЗП}}$ – суммарное сопротивление цепей заземления тяговой подстанции и сопротивления по отношению к земле рельсов её тупика;

$Z'_{\text{ДТ}}$ – сопротивления секций основных обмоток ДТ;

$Z_{\text{ДПК1}}; Z_{\text{ДПН1}}$ – сопротивления дроссельных перемычек в конце и начале первой рельсовой нити;

$Z_{\text{ДПК2}}; Z_{\text{ДПН2}}$ – сопротивления дроссельных перемычек в конце и начале второй рельсовой нити;

$Z_{11}^A, Z_{11}^B \dots Z_{11}^N$ – сопротивления рельсов, входящие в левые плечи трёхполюсников первой рельсовой нити, соответствующего отрезка рельсовой линии с учётом сопротивлений в соединениях рельсовых звеньев;

$Z_{21}^A, Z_{21}^B \dots Z_{21}^N$ – сопротивления рельсов, входящие в правые плечи трёхполюсников первой рельсовой нити, соответствующего отрезка рельсовой линии с учётом сопротивлений в соединениях рельсовых звеньев;

$Z_{12}^A, Z_{12}^B \dots Z_{12}^N$ – сопротивления рельсов, входящие в левые плечи трёхполюсников второй рельсовой нити, соответствующего отрезка рельсовой линии с учётом сопротивлений в соединениях рельсовых звеньев;

$Z_{22}^A, Z_{22}^B \dots Z_{22}^N$ – сопротивления рельсов, входящие в правые плечи трёхполюсников второй рельсовой нити, соответствующего отрезка рельсовой линии с учётом сопротивлений в соединениях рельсовых звеньев;

$Z_{\text{М11}}^A, Z_{\text{М11}}^B \dots Z_{\text{М11}}^N$ – магнитные сопротивления, входящие в левые плечи трёхполюсников первой рельсовой нити соответствующего отрезка рельсовой линии;

$Z_{\text{М21}}^A, Z_{\text{М21}}^B \dots Z_{\text{М21}}^N$ – магнитные сопротивления, входящие в правые плечи трёхполюсников первой рельсовой нити соответствующего отрезка рельсовой линии;

$Z_{M12}^A, Z_{M12}^B \dots Z_{M12}^N$ – магнитные сопротивления, входящие в левые плечи трёх- полюсников второй рельсовой нити соответствующего отрезка рельсовой линии;

$Z_{M22}^A, Z_{M22}^B \dots Z_{M22}^N$ – магнитные сопротивления, входящие в правые плечи трёх- полюсников второй рельсовой нити соответствующего отрезка рельсовой линии;

$R_{P31}^A, R_{P31}^B \dots R_{P31}^N$ – поперечные сопротивления трёхполюсников первой рельсо- вой нити в соответствующем отрезке рельсовой линии;

$R_{P32}^A, R_{P32}^B \dots R_{P32}^N$ – поперечные сопротивления трёхполюсников второй рельсо- вой нити в соответствующем отрезке рельсовой линии;

$R_O^A, R_O^B \dots R_O^N$ – суммарное сопротивление цепей заземления опор контактной сети, подключаемых к рельсам на соответствующем отрезке рельсовой линии;

\dot{I}_T – тяговый ток в рельсовой линии;

$\dot{I}_{ОЛ}$ – тяговый ток в отсасывающей линии тяговой подстанции;

$\dot{I}_{ЗП}$ – тяговый ток в контуре цепей заземления тяговой подстанции;

$\dot{I}_{11}^A, \dot{I}_{11}^B \dots \dot{I}_{11}^N$ – тяговые токи в рельсах в концах соответствующих расчётных отрезков первой рельсовой нити;

$\dot{I}_{21}^A, \dot{I}_{21}^B \dots \dot{I}_{21}^N$ – тяговые токи в рельсах в началах соответствующих расчётных отрезков первой рельсовой нити;

$\dot{I}_{12}^A, \dot{I}_{12}^B \dots \dot{I}_{12}^N$ – тяговые токи в рельсах в концах соответствующих расчётных отрезков второй рельсовой нити;

$\dot{I}_{22}^A, \dot{I}_{22}^B \dots \dot{I}_{22}^N$ – тяговые токи в рельсах в началах соответствующих расчётных отрезков второй рельсовой нити;

$\dot{I}_{Y1}^A, \dot{I}_{Y1}^B \dots \dot{I}_{Y1}^N$ – тяговые токи, стекающие из рельсов в землю из соответствующи- х отрезков первой рельсовой нити;

$\dot{I}_{Y2}^A, \dot{I}_{Y2}^B \dots \dot{I}_{Y2}^N$ – тяговые токи, стекающие из рельсов в землю из соответствующи- х отрезков второй рельсовой нити;

$l_{PЛ}^A, l_{PЛ}^B \dots l_{PЛ}^N$ – длины соответствующих отрезков рельсовой линии.

При нормальном режиме работы РЦ, оборудованной изолирующими стыками, уровень помех на её аппаратуру, подключённую к рельсам в начале рельсовой линии, определяется асимметрией тягового тока в первой \dot{I}_{21}^N и второй \dot{I}_{22}^N рельсовых нитях на входном конце РЦ. Асимметрия тягового тока в первой \dot{I}_{11}^A и второй \dot{I}_{12}^A рельсовых нитях на выходном конце оказывает влияние на аппаратуру, подключённую в конце РЦ.

В случае, если утечки тягового тока из рельсов в землю отсутствуют, значение тягового тока, а также величина его асимметрии в начале и конце рельсовой линии одинаковы. Однако, если часть тягового тока стекает из рельсов в землю, то это равенство нарушается и по мере протекания тяговых токов по рельсовой линии их величины меняются в зависимости от соотношения продольных и поперечных сопротивлений рельсовых нитей.

2.2 Методика вычисления сопротивлений в расчётной схеме

Для расчёта тягового тока в рельсовой линии необходимо рассчитать значения всех сопротивлений в схеме её замещения. В общем случае сопротивления рельсовых нитей изменяются по их длине, причём неодинаково в разных рельсовых нитях. Проведение вычислений упрощается, если в пределах отрезка рельсовой нити её продольное сопротивление не меняется. В таких случаях сопротивления правого и левого продольных плеч трёхполюсника одинаковы по величине.

Сопротивления отрезков рельсовых нитей, входящих в продольные плечи трёхполюсников, моделирующих соответствующий отрезок рельсовой линии, рассчитываются по формуле:

$$Z_{11}^K = Z_{21}^K = 0,5z_{PH1}^K l_{PL}^K; \quad Z_{12}^K = Z_{22}^K = 0,5z_{PH2}^K l_{PL}^K, \quad (2.1)$$

где $z_{PH1}^K; z_{PH2}^K$ – удельные сопротивления первой и второй рельсовых нитей соответствующего отрезка рельсовой линии с учётом сопротивлений в соединениях рельсовых звеньев;

l_{PJ}^K – длина соответствующего отрезка рельсовой линии.

Магнитные сопротивления рельсовых нитей на первом шаге расчёта принимаются одинаковыми в трёхполюсниках, моделирующих отрезки рельсовой линии равной длины, и, например, для отрезка K находятся по формуле:

$$Z_{M11}^K = Z_{M21}^K = Z_{M12}^K = Z_{M22}^K = 0,5z_M l_{PJ}^K, \quad (2.2)$$

где z_M – удельное магнитное сопротивление рельсовых нитей, которое находится по формуле:

$$z_M = \omega M_{12} e^{j90^\circ} = j2\pi f_\Gamma M_{12}. \quad (2.3)$$

Сопротивления изоляции рельсовых нитей по отношению к земле и сопротивление цепей заземления на рельс опор контактной сети и других конструкций рассчитываются по формуле:

$$R_{P31}^K = \frac{r_{P31}^K}{l_{PJ}^K}; \quad R_{P32}^K = \frac{r_{P32}^K}{l_{PJ}^K}; \quad R_O^K = \frac{r_O^K}{l_{PJ}^K}, \quad (2.4)$$

где $r_{P31}^K; r_{P32}^K$ – удельные сопротивления первой и второй рельсовых нитей по отношению к земле на соответствующем отрезке рельсовой линии;

r_O^K – удельное сопротивление цепей заземлений опор и различных конструкций на соответствующем отрезке рельсовой линии.

Найденные сопротивления отрезков рельсовых нитей дают возможность исследовать процесс растекания тягового тока в рассматриваемой схеме для любых вариантов распределения сопротивлений рельсовой линии по её длине.

2.3 Методика вычисления тяговых токов в расчётной схеме при нормальном режиме работы рельсовой цепи

Определять значения токов в элементах схемы можно составлением уравнений по закону Кирхгофа или методом контурных токов. Чтобы определить значения тяговых токов в схеме замещения рельсовой линии (рисунок 2.1), составим уравнения по второму закону Кирхгофа для каждого независимого контура. Число таких контуров равно $k - n + 1$, где k – число неизвестных токов, а n – число узлов в схеме [35].

Для упрощения нумерации искомым токам считаем, что в число неизвестных токов k входят все токи, показанные на схеме на рисунке 2.1, кроме тока в начале рельсовой линии \dot{I}_T , который в данной модели создаётся источником тока. По этой причине в число узлов n входят, и точки соединения трёх и более элементов, и соединения двух трёхполюсников, моделирующих соседние отрезки рельсовой нити.

Поперечные сопротивления отрезков первой рельсовой нити представляются как параллельное соединение сопротивления изоляции отрезка этой рельсовой нити и сопротивления цепей заземления опор контактной сети, если они подключены к рельсам на рассматриваемом отрезке.

Тогда число неизвестных токов и число узлов для N отрезков рельсовой линии:

$$k = 6 \cdot N + 2; \quad n = 4 \cdot N + 2, \quad (2.5)$$

Следовательно, число уравнений по второму закону Кирхгофа равно $2 \cdot N + 1$.

В общем случае система уравнений для контуров, показанных на рисунке 2.1 получена в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\left(Z'_{\text{ДТ}} + Z_{\text{ДПК1}} + Z_{11}^A + Z_{\text{М11}}^A \right) \dot{I}_{11}^A + R_{\text{ОЛ}} \dot{I}_{\text{ОЛ}} - R_{3\text{П}} \dot{I}_{3\text{П}} - \frac{R_{\text{P31}}^A R_{\text{O}}^A}{R_{\text{P31}}^A + R_{\text{O}}^A} \dot{I}_{\text{Y1}}^A = 0; \\
\left(Z'_{\text{ДТ}} + Z_{\text{ДПК2}} + Z_{12}^A + Z_{\text{М12}}^A \right) \dot{I}_{12}^A + R_{\text{ОЛ}} \dot{I}_{\text{ОЛ}} - R_{3\text{П}} \dot{I}_{3\text{П}} - R_{\text{P32}}^A \dot{I}_{\text{Y2}}^A = 0; \\
\left(Z_{11}^B + Z_{\text{М11}}^B \right) \dot{I}_{11}^B + \left(Z_{21}^A + Z_{\text{М21}}^A \right) \dot{I}_{21}^A + \frac{R_{\text{P31}}^A R_{\text{O}}^A}{R_{\text{P31}}^A + R_{\text{O}}^A} \dot{I}_{\text{Y1}}^A - \frac{R_{\text{P31}}^B R_{\text{O}}^B}{R_{\text{P31}}^B + R_{\text{O}}^B} \dot{I}_{\text{Y1}}^B = 0; \\
\left(Z_{12}^B + Z_{\text{М12}}^B \right) \dot{I}_{12}^B + \left(Z_{22}^A + Z_{\text{М22}}^A \right) \dot{I}_{22}^A + R_{\text{P32}}^A \dot{I}_{\text{Y2}}^A - R_{\text{P32}}^B \dot{I}_{\text{Y2}}^B = 0; \\
\left(Z_{11}^C + Z_{\text{М11}}^C \right) \dot{I}_{11}^C + \left(Z_{21}^B + Z_{\text{М21}}^B \right) \dot{I}_{21}^B + \frac{R_{\text{P31}}^B R_{\text{O}}^B}{R_{\text{P31}}^B + R_{\text{O}}^B} \dot{I}_{\text{Y1}}^B - \frac{R_{\text{P31}}^C R_{\text{O}}^C}{R_{\text{P31}}^C + R_{\text{O}}^C} \dot{I}_{\text{Y1}}^C = 0; \\
\left(Z_{12}^C + Z_{\text{М12}}^C \right) \dot{I}_{12}^C + \left(Z_{22}^B + Z_{\text{М22}}^B \right) \dot{I}_{22}^B + R_{\text{P32}}^B \dot{I}_{\text{Y2}}^B - R_{\text{P32}}^C \dot{I}_{\text{Y2}}^C = 0; \\
\vdots \\
\left(Z_{11}^N + Z_{\text{М11}}^N \right) \dot{I}_{11}^N + \left(Z_{21}^{N-1} + Z_{\text{М21}}^{N-1} \right) \dot{I}_{21}^{N-1} + \frac{R_{\text{P31}}^{N-1} R_{\text{O}}^{N-1}}{R_{\text{P31}}^{N-1} + R_{\text{O}}^{N-1}} \dot{I}_{\text{Y1}}^{N-1} - \frac{R_{\text{P31}}^N R_{\text{O}}^N}{R_{\text{P31}}^N + R_{\text{O}}^N} \dot{I}_{\text{Y1}}^N = \\
= 0; \\
\left(Z_{12}^N + Z_{\text{М12}}^N \right) \dot{I}_{12}^N + \left(Z_{22}^{N-1} + Z_{\text{М22}}^{N-1} \right) \dot{I}_{22}^{N-1} + R_{\text{P32}}^{N-1} \dot{I}_{\text{Y2}}^{N-1} - R_{\text{P32}}^N \dot{I}_{\text{Y2}}^N = 0; \\
\left(Z_{21}^N + Z_{\text{М21}}^N + Z_{\text{ДПК1}} + Z'_{\text{ДТ}} \right) \dot{I}_{21}^N + \frac{R_{\text{P31}}^N R_{\text{O}}^N}{R_{\text{P31}}^N + R_{\text{O}}^N} \dot{I}_{\text{Y1}}^N - R_{\text{P32}}^N \dot{I}_{\text{Y2}}^N - \\
- \left(Z_{22}^N + Z_{\text{М22}}^N + Z_{\text{ДПК2}} + Z'_{\text{ДТ}} \right) \dot{I}_{22}^N = 0.
\end{array} \right. \quad (2.6)$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа для решения данной системы необходимо составить $(n - 1)$ уравнений, где n – число узлов в схеме [35]. В рельсовой линии, разделённой на N отрезков с учётом формулы (2.5) число уравнений по первому закону Кирхгофа равно $4 \cdot N + 1$.

Для составления уравнений по первому закону Кирхгофа выразим токи утечки через токи в рельсовых нитях для каждого отрезка рельсовой линии:

$$\dot{I}_{\text{Y1}}^A = \dot{I}_{21}^A - \dot{I}_{11}^A; \quad \dot{I}_{\text{Y2}}^A = \dot{I}_{22}^A - \dot{I}_{12}^A; \quad (2.7)$$

$$\dot{I}_{\text{Y1}}^B = \dot{I}_{21}^B - \dot{I}_{11}^B; \quad \dot{I}_{\text{Y2}}^B = \dot{I}_{22}^B - \dot{I}_{12}^B; \quad (2.8)$$

⋮

$$\dot{I}_{y1}^N = \dot{I}_{21}^N - \dot{I}_{11}^N; \quad \dot{I}_{y2}^N = \dot{I}_{22}^N - \dot{I}_{12}^N. \quad (2.9)$$

Число уравнений, аналогичных (2.7) – (2.9), должно быть равно числу отрезков, на которые разделена рассматриваемая рельсовая линия.

Из схемы на рисунке 2.1 видно, что токи в рельсовых нитях, втекающие в отрезок A , равны токам, вытекающим из отрезка B :

$$\dot{I}_{21}^A = \dot{I}_{11}^B; \quad \dot{I}_{22}^A = \dot{I}_{12}^B. \quad (2.10)$$

Число уравнений, аналогичных (2.10), должно быть равно $(N - 1)$, где N – число отрезков, на которые разделена рассматриваемая рельсовая линия.

В соответствии с первым законом Кирхгофа для расчётной схемы справедливы следующие формулы:

$$\dot{I}_T = \dot{I}_{ОЛ} + \dot{I}_{ЗП}; \quad \dot{I}_{ОЛ} = \dot{I}_{11}^A + \dot{I}_{12}^A; \quad \dot{I}_T = \dot{I}_{21}^N + \dot{I}_{22}^N. \quad (2.11)$$

Значения всех токов в схеме можно найти путём решения системы уравнений (2.6) после подстановки в неё формул (2.7) – (2.11).

По найденным значениям тяговых токов находится величина их асимметрии в начале или конце любого из отрезков рельсовой линии. Так, например, коэффициент асимметрии тягового тока в точке подключения к рельсам аппаратуры РЦ на её входном конце:

$$k_{\Delta I}^{\text{ВхРЦ}} = \frac{|\dot{I}_{21}^N - \dot{I}_{22}^N|}{\dot{I}_{21}^N + \dot{I}_{22}^N}. \quad (2.12)$$

Коэффициент асимметрии тягового тока в точке подключения к рельсам аппаратуры РЦ на её выходном конце:

$$k_{AI}^{\text{ВыхРЦ}} = \frac{|\dot{I}_{11}^A - \dot{I}_{12}^A|}{\dot{I}_{11}^A + \dot{I}_{12}^A}. \quad (2.13)$$

Второй шаг расчёта необходим для определения тяговых токов в рельсовых нитях с учётом взаимной индуктивности.

Действие взаимной индуктивности между рельсовыми нитями рельсовой линии вызывает увеличение асимметрии тягового тока [133]. Это объясняется появлением в рельсовых нитях противоЭДС, вызванной влиянием взаимной индуктивности. За счёт этого увеличивается падение напряжения на магнитном сопротивлении в той рельсовой нити, в которой величина тягового тока меньше, и уменьшается падение напряжения на магнитном сопротивлении другой рельсовой нити.

Учесть данные падения напряжения можно, увеличивая численные значения магнитных сопротивлений на поправочные коэффициенты r (от англ. *ratio*, «отношение»), равные отношению найденной на первом этапе расчётов величины тягового тока в другой рельсовой нити к величине тягового тока в своей рельсовой нити. Отношения тяговых токов находятся в началах и концах каждого отрезка рельсовой линии, когда эти токи заметно различаются из-за утечек тягового тока из рельсов в землю по цепям заземления опор контактной сети, подключаемых к рельсам.

$$r_{11}^A = \frac{\dot{I}_{12}^A}{\dot{I}_{11}^A}; \quad r_{12}^A = \frac{\dot{I}_{11}^A}{\dot{I}_{12}^A}; \quad r_{21}^A = \frac{\dot{I}_{22}^A}{\dot{I}_{21}^A}; \quad r_{22}^A = \frac{\dot{I}_{21}^A}{\dot{I}_{22}^A}; \quad (2.14)$$

$$r_{11}^B = \frac{\dot{I}_{12}^B}{\dot{I}_{11}^B}; \quad r_{12}^B = \frac{\dot{I}_{11}^B}{\dot{I}_{12}^B}; \quad r_{21}^B = \frac{\dot{I}_{22}^B}{\dot{I}_{21}^B}; \quad r_{22}^B = \frac{\dot{I}_{21}^B}{\dot{I}_{22}^B}; \quad (2.15)$$

⋮

$$r_{11}^N = \frac{\dot{I}_{12}^N}{\dot{I}_{11}^N}; \quad r_{12}^N = \frac{\dot{I}_{11}^N}{\dot{I}_{12}^N}; \quad r_{21}^N = \frac{\dot{I}_{22}^N}{\dot{I}_{21}^N}; \quad r_{22}^N = \frac{\dot{I}_{21}^N}{\dot{I}_{22}^N}. \quad (2.16)$$

Соотношения тяговых токов по формулам (2.14) – (2.16) находятся в началах и концах каждого отрезка рельсовой линии.

Тогда система уравнений (2.9) на следующем шаге расчёта примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \left(Z'_{\text{дт}} + Z_{\text{дп1}} + Z_{11}^A + r_{11}^A Z_{\text{M11}}^A \right) \dot{I}_{11}^A + R_{\text{ол}} \dot{I}_{\text{ол}} - R_{3\text{п}} \dot{I}_{3\text{п}} - \frac{R_{\text{п31}}^A R_{\text{о}}^A}{R_{\text{п31}}^A + R_{\text{о}}^A} \dot{I}_{\text{y1}}^A = 0; \\
 \left(Z'_{\text{дт}} + Z_{\text{дп2}} + Z_{12}^A + r_{12}^A Z_{\text{M12}}^A \right) \dot{I}_{12}^A + R_{\text{ол}} \dot{I}_{\text{ол}} - R_{3\text{п}} \dot{I}_{3\text{п}} - R_{\text{п32}}^A \dot{I}_{\text{y2}}^A = 0; \\
 \left(Z_{11}^B + r_{11}^B Z_{\text{M11}}^B \right) \dot{I}_{11}^B + \left(Z_{21}^A + r_{21}^A Z_{\text{M21}}^A \right) \dot{I}_{21}^A + \frac{R_{\text{п31}}^A R_{\text{о}}^A}{R_{\text{п31}}^A + R_{\text{о}}^A} \dot{I}_{\text{y1}}^A - \frac{R_{\text{п31}}^B R_{\text{о}}^B}{R_{\text{п31}}^B + R_{\text{о}}^B} \dot{I}_{\text{y1}}^B = 0; \\
 \left(Z_{12}^B + r_{12}^B Z_{\text{M12}}^B \right) \dot{I}_{12}^B + \left(Z_{22}^A + r_{22}^A Z_{\text{M22}}^A \right) \dot{I}_{22}^A + R_{\text{п32}}^A \dot{I}_{\text{y2}}^A - R_{\text{п32}}^B \dot{I}_{\text{y2}}^B = 0; \\
 \left(Z_{11}^C + r_{11}^C Z_{\text{M11}}^C \right) \dot{I}_{11}^C + \left(Z_{21}^B + r_{21}^B Z_{\text{M21}}^B \right) \dot{I}_{21}^B + \frac{R_{\text{п31}}^B R_{\text{о}}^B}{R_{\text{п31}}^B + R_{\text{о}}^B} \dot{I}_{\text{y1}}^B - \frac{R_{\text{п31}}^C R_{\text{о}}^C}{R_{\text{п31}}^C + R_{\text{о}}^C} \dot{I}_{\text{y1}}^C = 0; \\
 \left(Z_{12}^C + r_{12}^C Z_{\text{M12}}^C \right) \dot{I}_{12}^C + \left(Z_{22}^B + r_{22}^B Z_{\text{M22}}^B \right) \dot{I}_{22}^B + R_{\text{п32}}^B \dot{I}_{\text{y2}}^B - R_{\text{п32}}^C \dot{I}_{\text{y2}}^C = 0; \\
 \vdots \\
 \left(Z_{11}^N + r_{11}^N Z_{\text{M11}}^N \right) \dot{I}_{11}^N + \left(Z_{21}^{N-1} + r_{21}^{N-1} Z_{\text{M21}}^{N-1} \right) \dot{I}_{21}^{N-1} + \frac{R_{\text{п31}}^{N-1} R_{\text{о}}^{N-1}}{R_{\text{п31}}^{N-1} + R_{\text{о}}^{N-1}} \dot{I}_{\text{y1}}^{N-1} - \frac{R_{\text{п31}}^N R_{\text{о}}^N}{R_{\text{п31}}^N + R_{\text{о}}^N} \dot{I}_{\text{y1}}^N = \\
 = 0; \\
 \left(Z_{12}^N + r_{12}^N Z_{\text{M12}}^N \right) \dot{I}_{12}^N + \left(Z_{22}^{N-1} + r_{22}^{N-1} Z_{\text{M22}}^{N-1} \right) \dot{I}_{22}^{N-1} + R_{\text{п32}}^{N-1} \dot{I}_{\text{y2}}^{N-1} - R_{\text{п32}}^N \dot{I}_{\text{y2}}^N = 0; \\
 \left(Z_{21}^N + r_{21}^N Z_{\text{M21}}^N + Z_{\text{дпк1}} + Z'_{\text{дт}} \right) \dot{I}_{21}^N + \frac{R_{\text{п31}}^N R_{\text{о}}^N}{R_{\text{п31}}^N + R_{\text{о}}^N} \dot{I}_{\text{y1}}^N - R_{\text{п32}}^N \dot{I}_{\text{y2}}^N - \\
 - \left(Z_{22}^N + r_{22}^N Z_{\text{M22}}^N + Z_{\text{дпк2}} + Z'_{\text{дт}} \right) \dot{I}_{22}^N = 0.
 \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Расчёты аналогичны вычислениям первого шага. В систему уравнений (2.17) подставляются формулы (2.7) – (2.11), находятся величины всех токов в схеме, а затем по формулам (2.12) и (2.13) определяются реальные значения коэффициента асимметрии тягового тока в точках подключения к рельсам аппаратуры РЦ на её входном и выходном концах.

2.4 Методика вычисления тяговых токов под катушками автоматической локомотивной сигнализации

Тяговый ток растекается по рельсовым нитям от головного электровоза поезда по обе стороны от него. Уровень помех на аппаратуру АЛС определяется величиной асимметрии тягового тока в рельсах под приёмными локомотивными катушками. При вступлении поезда на K -й отрезок рельсовой линии токи в первой \dot{I}_{21}^K и второй \dot{I}_{22}^K рельсовых нитях являются тяговыми токами под катушками АЛС.

При вступлении поезда на рельсовую линию он своими колёсными парами шунтирует основную обмотку ДТ, установленного на входном конце рельсовой цепи, а также дроссельные переключки. В результате расчётная схема при моделировании вступления поезда на N -й отрезок рельсовой линии принимает вид, показанный на рисунке 2.2.

Расчёт сопротивлений данной схемы можно проводить по формулам (2.1) – (2.4).

Методика расчёта тяговых токов в режиме АЛС аналогична методике, рассмотренной для РЦ при нормальном режиме работы. В данном случае для моделирования движения поезда по неоднородной рельсовой линии, приближающегося к выходному дроссель-трансформатору, расчёты приходится проводить отдельно при вступлении поезда на каждый из отрезков рассматриваемой рельсовой линии. По мере приближения поезда к выходному дроссель-трансформатору число уравнений уменьшается.

В качестве примера приведём систему уравнений по второму закону Кирхгофа при вступлении поезда на N -й отрезок (рисунок 2.2). Число уравнений в данной системе остаётся таким же как при нормальном режиме работы РЦ, но изменяется уравнение для контура в начале РЦ.

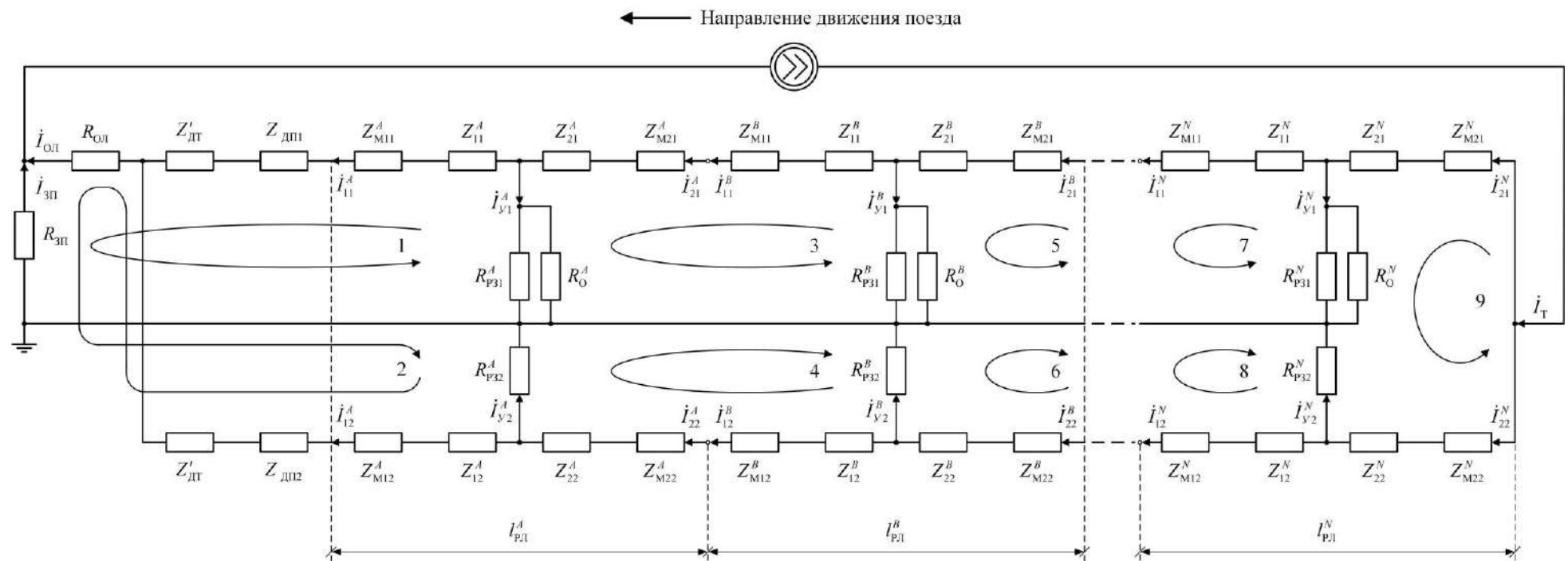


Рисунок 2.2 – Модель рельсовой линии при движении поезда по РЦ с изолирующими стыками или по перегону без изолирующих стыков и без уравнивающих дросселей

$$\left\{ \begin{array}{l}
\left(Z'_{\text{ДТ}} + Z_{\text{ДП1}} + Z_{11}^A + Z_{\text{М11}}^A \right) \dot{I}_{11}^A + R_{\text{ОЛ}} \dot{I}_{\text{ОЛ}} - R_{3\Pi} \dot{I}_{3\Pi} - \frac{R_{\text{P31}}^A R_{\text{O}}^A}{R_{\text{P31}}^A + R_{\text{O}}^A} \dot{I}_{\text{Y1}}^A = 0; \\
\left(Z'_{\text{ДТ}} + Z_{\text{ДП2}} + Z_{12}^A + Z_{\text{М12}}^A \right) \dot{I}_{12}^A + R_{\text{ОЛ}} \dot{I}_{\text{ОЛ}} - R_{3\Pi} \dot{I}_{3\Pi} - R_{\text{P32}}^A \dot{I}_{\text{Y2}}^A = 0; \\
\left(Z_{11}^B + Z_{\text{М11}}^B \right) \dot{I}_{11}^B + \left(Z_{21}^A + Z_{\text{М21}}^A \right) \dot{I}_{21}^A + \frac{R_{\text{P31}}^A R_{\text{O}}^A}{R_{\text{P31}}^A + R_{\text{O}}^A} \dot{I}_{\text{Y1}}^A - \frac{R_{\text{P31}}^B R_{\text{O}}^B}{R_{\text{P31}}^B + R_{\text{O}}^B} \dot{I}_{\text{Y1}}^B = 0; \\
\left(Z_{12}^B + Z_{\text{М12}}^B \right) \dot{I}_{12}^B + \left(Z_{22}^A + Z_{\text{М22}}^A \right) \dot{I}_{22}^A + R_{\text{P32}}^A \dot{I}_{\text{Y2}}^A - R_{\text{P32}}^B \dot{I}_{\text{Y2}}^B = 0; \\
\left(Z_{11}^C + Z_{\text{М11}}^C \right) \dot{I}_{11}^C + \left(Z_{21}^B + Z_{\text{М21}}^B \right) \dot{I}_{21}^B + \frac{R_{\text{P31}}^B R_{\text{O}}^B}{R_{\text{P31}}^B + R_{\text{O}}^B} \dot{I}_{\text{Y1}}^B - \frac{R_{\text{P31}}^C R_{\text{O}}^C}{R_{\text{P31}}^C + R_{\text{O}}^C} \dot{I}_{\text{Y1}}^C = 0; \\
\left(Z_{12}^C + Z_{\text{М12}}^C \right) \dot{I}_{12}^C + \left(Z_{22}^B + Z_{\text{М22}}^B \right) \dot{I}_{22}^B + R_{\text{P32}}^B \dot{I}_{\text{Y2}}^B - R_{\text{P32}}^C \dot{I}_{\text{Y2}}^C = 0; \\
\vdots \\
\left(Z_{11}^N + Z_{\text{М11}}^N \right) \dot{I}_{11}^N + \left(Z_{21}^{N-1} + Z_{\text{М21}}^{N-1} \right) \dot{I}_{21}^{N-1} + \frac{R_{\text{P31}}^{N-1} R_{\text{O}}^{N-1}}{R_{\text{P31}}^{N-1} + R_{\text{O}}^{N-1}} \dot{I}_{\text{Y1}}^{N-1} - \frac{R_{\text{P31}}^N R_{\text{O}}^N}{R_{\text{P31}}^N + R_{\text{O}}^N} \dot{I}_{\text{Y1}}^N = 0; \\
\left(Z_{12}^N + Z_{\text{М12}}^N \right) \dot{I}_{12}^N + \left(Z_{22}^{N-1} + Z_{\text{М22}}^{N-1} \right) \dot{I}_{22}^{N-1} + R_{\text{P32}}^{N-1} \dot{I}_{\text{Y2}}^{N-1} - R_{\text{P32}}^N \dot{I}_{\text{Y2}}^N = 0; \\
\left(Z_{21}^N + Z_{\text{М21}}^N \right) \dot{I}_{21}^N + \frac{R_{\text{P31}}^N R_{\text{O}}^N}{R_{\text{P31}}^N + R_{\text{O}}^N} \dot{I}_{\text{Y1}}^N - R_{\text{P32}}^N \dot{I}_{\text{Y2}}^N - \left(Z_{22}^N + Z_{\text{М22}}^N \right) \dot{I}_{22}^N = 0.
\end{array} \right. \quad (2.18)$$

Также с использованием формул (2.7) – (2.11) составляются $(4 \cdot N + 1)$ уравнений по первому закону Кирхгофа. В результате решения данной системы уравнений находятся значения всех токов в схеме при вступлении поезда на N -й отрезок рельсовой линии.

Коэффициент асимметрии тягового тока под приёмными локомотивными катушками АЛС при вступлении поезда на N -й отрезок:

$$k_{\text{АЛС}} = \frac{|\dot{I}_{21}^N - \dot{I}_{22}^N|}{\dot{I}_{21}^N + \dot{I}_{22}^N}. \quad (2.19)$$

Второй шаг расчёта для учёта влияния взаимной индуктивности аналогичен данному шагу в пункте 2.2. По формулам (2.14) – (2.16) находятся отношения тяговых токов в начале и конце каждого отрезка рельсовой линии, которые затем подставляются в формулу (2.18).

Стоит отметить, что разработанная методика расчёта распределения тягового тока под катушками АЛС одинаково справедлива как при движении поезда по кодовой РЦ, ограниченной изолирующими стыками, так и по перегону с тональными рельсовыми цепями (ТРЦ) без изолирующих стыков при отсутствии уравнивающих дросселей. В первом случае расчёты проводятся в пределах рассматриваемой РЦ, во втором – в пределах всего перегона.

2.5 Методика вычисления тяговых токов под катушками автоматической локомотивной сигнализации на перегоне с бесстыковыми рельсовыми цепями с уравнивающими дросселями

На перегонах, оборудованных ТРЦ без изолирующих стыков, ДТ устанавливаются только в его начале и конце [8, 22], и асимметрия тягового тока изменяется по всему перегону.

Для уменьшения пределов изменения асимметрии тягового тока вдоль перегона, оборудованного бесстыковыми тональными рельсовыми цепями (ТРЦ) около каждой сигнальной точки устанавливаются уравнивающие дроссели [60]. Методики оценки степени снижения асимметрии тягового тока данными дросселями и величин протекающих по ним токов в настоящее время нет. Использование классической теории рельсовых цепей, основанной на дифференциальных уравнениях распределения тока и напряжения в рельсовых линиях как электрических линиях с распределёнными параметрами, для этого затруднительно.

Расчётная схема для моделирования распределения гармоник тягового тока по неоднородной рельсовой линии на однопутном перегоне с бесстыковыми ТРЦ, оборудованном уравнивающими дросселями имеет вид, показанный на рисунке 2.3.

По сравнению с рисунком 2.2 на схеме показаны уравнивающие дроссели с сопротивлениями $Z_{д1} \dots Z_{ди}$, по которым тяговые токи $\dot{I}_{д1} \dots \dot{I}_{ди}$ перетекают в первую рельсовую нить из второй.

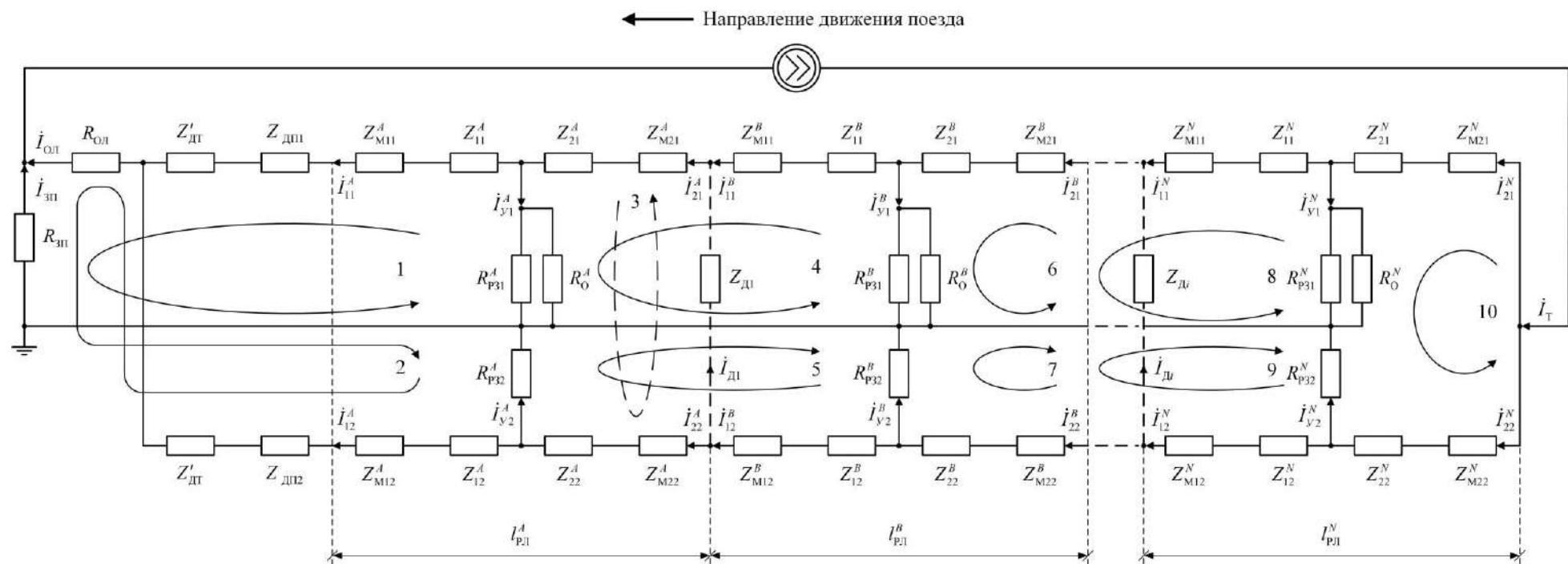


Рисунок 2.3 – Модель рельсовой линии при движении поезда по перегону, оборудованному бесстыковыми рельсовыми цепями с уравнивающими дросселями

При наличии в схеме уравнивающего дросселя система уравнений (2.18) включает в себя дополнительное уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа для контура, в который входит сопротивление данного дросселя (рисунок 2.3). Так, если уравнивающий дроссель D_1 подключен, например, между отрезками A и B , то при вступлении поезда на N -й отрезок система уравнений примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} (Z'_{ДТ} + Z_{ДП1} + Z_{11}^A + Z_{M11}^A) \dot{I}_{11}^A + R_{ОЛ} \dot{I}_{ОЛ} - R_{3П} \dot{I}_{3П} - \frac{R_{P31}^A R_O^A}{R_{P31}^A + R_O^A} \dot{I}_{y1}^A = 0; \\ (Z'_{ДТ} + Z_{ДП2} + Z_{12}^A + Z_{M12}^A) \dot{I}_{12}^A + R_{ОЛ} \dot{I}_{ОЛ} - R_{3П} \dot{I}_{3П} - R_{P32}^A \dot{I}_{y2}^A = 0; \\ (Z_{21}^A + Z_{M21}^A) \dot{I}_{21}^A + \frac{R_{P31}^A R_O^A}{R_{P31}^A + R_O^A} \dot{I}_{y1}^A - R_{P32}^A \dot{I}_{y2}^A - (Z_{22}^A + Z_{M22}^A) \dot{I}_{22}^A + Z_{D1} \dot{I}_{D1} = 0; \\ (Z_{11}^B + Z_{M11}^B) \dot{I}_{11}^B + (Z_{21}^A + Z_{M21}^A) \dot{I}_{21}^A + \frac{R_{P31}^A R_O^A}{R_{P31}^A + R_O^A} \dot{I}_{y1}^A - \frac{R_{P31}^B R_O^B}{R_{P31}^B + R_O^B} \dot{I}_{y1}^B = 0; \\ (Z_{12}^B + Z_{M12}^B) \dot{I}_{12}^B + (Z_{22}^A + Z_{M22}^A) \dot{I}_{22}^A + R_{P32}^A \dot{I}_{y2}^A - R_{P32}^B \dot{I}_{y2}^B = 0; \\ (Z_{11}^C + Z_{M11}^C) \dot{I}_{11}^C + (Z_{21}^B + Z_{M21}^B) \dot{I}_{21}^B + \frac{R_{P31}^B R_O^B}{R_{P31}^B + R_O^B} \dot{I}_{y1}^B - \frac{R_{P31}^C R_O^C}{R_{P31}^C + R_O^C} \dot{I}_{y1}^C = 0; \\ (Z_{12}^C + Z_{M12}^C) \dot{I}_{12}^C + (Z_{22}^B + Z_{M22}^B) \dot{I}_{22}^B + R_{P32}^B \dot{I}_{y2}^B - R_{P32}^C \dot{I}_{y2}^C = 0; \\ \vdots \\ (Z_{11}^N + Z_{M11}^N) \dot{I}_{11}^N + (Z_{21}^{N-1} + Z_{M21}^{N-1}) \dot{I}_{21}^{N-1} + \frac{R_{P31}^{N-1} R_O^{N-1}}{R_{P31}^{N-1} + R_O^{N-1}} \dot{I}_{y1}^{N-1} - \frac{R_{P31}^N R_O^N}{R_{P31}^N + R_O^N} \dot{I}_{y1}^N = \\ = 0; \\ (Z_{12}^N + Z_{M12}^N) \dot{I}_{12}^N + (Z_{22}^{N-1} + Z_{M22}^{N-1}) \dot{I}_{22}^{N-1} + R_{P32}^{N-1} \dot{I}_{y2}^{N-1} - R_{P32}^N \dot{I}_{y2}^N = 0; \\ (Z_{21}^N + Z_{M21}^N) \dot{I}_{21}^N + \frac{R_{P31}^N R_O^N}{R_{P31}^N + R_O^N} \dot{I}_{y1}^N - R_{P32}^N \dot{I}_{y2}^N - (Z_{22}^N + Z_{M22}^N) \dot{I}_{22}^N = 0. \end{array} \right. \quad (2.20)$$

Как видно из схемы на рисунке 2.3, тяговый ток после точки подключения уравнивающего дросселя согласно первому закону Кирхгофа связан с током до этой точки по следующим образом:

$$\dot{i}_{21}^A = \dot{i}_{11}^B + \dot{i}_{Д1}; \quad \dot{i}_{22}^A = \dot{i}_{12}^B - \dot{i}_{Д1}. \quad (2.21)$$

Далее в систему уравнений (20) необходимо подставить формулы (2.7) – (2.9), (2.11) и (2.21).

После дополнительного подключения уравнивающего дросселя $Д_i$ между отрезками $(N-1)$ и N система уравнений принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} (Z'_{ДТ} + Z_{ДП1} + Z_{11}^A + Z_{M11}^A) \dot{i}_{11}^A + R_{ОЛ} \dot{i}_{ОЛ} - R_{3П} \dot{i}_{3П} - \frac{R_{P31}^A R_O^A}{R_{P31}^A + R_O^A} \dot{i}_{y1}^A = 0; \\ (Z'_{ДТ} + Z_{ДП2} + Z_{12}^A + Z_{M12}^A) \dot{i}_{12}^A + R_{ОЛ} \dot{i}_{ОЛ} - R_{3П} \dot{i}_{3П} - R_{P32}^A \dot{i}_{y2}^A = 0; \\ (Z_{21}^A + Z_{M21}^A) \dot{i}_{21}^A + \frac{R_{P31}^A R_O^A}{R_{P31}^A + R_O^A} \dot{i}_{y1}^A - R_{P32}^A \dot{i}_{y2}^A - (Z_{22}^A + Z_{M22}^A) \dot{i}_{22}^A + Z_{Д1} \dot{i}_{Д1} = 0; \\ (Z_{11}^B + Z_{M11}^B) \dot{i}_{11}^B + (Z_{21}^A + Z_{M21}^A) \dot{i}_{21}^A + \frac{R_{P31}^A R_O^A}{R_{P31}^A + R_O^A} \dot{i}_{y1}^A - \frac{R_{P31}^B R_O^B}{R_{P31}^B + R_O^B} \dot{i}_{y1}^B = 0; \\ (Z_{12}^B + Z_{M12}^B) \dot{i}_{12}^B + (Z_{22}^A + Z_{M22}^A) \dot{i}_{22}^A + R_{P32}^A \dot{i}_{y2}^A - R_{P32}^B \dot{i}_{y2}^B = 0; \\ (Z_{11}^C + Z_{M11}^C) \dot{i}_{11}^C + (Z_{21}^B + Z_{M21}^B) \dot{i}_{21}^B + \frac{R_{P31}^B R_O^B}{R_{P31}^B + R_O^B} \dot{i}_{y1}^B - \frac{R_{P31}^C R_O^C}{R_{P31}^C + R_O^C} \dot{i}_{y1}^C = 0; \\ (Z_{12}^C + Z_{M12}^C) \dot{i}_{12}^C + (Z_{22}^B + Z_{M22}^B) \dot{i}_{22}^B + R_{P32}^B \dot{i}_{y2}^B - R_{P32}^C \dot{i}_{y2}^C = 0; \\ \vdots \\ (Z_{21}^{N-1} + Z_{M21}^{N-1}) \dot{i}_{21}^{N-1} + \frac{R_{P31}^{N-1} R_O^{N-1}}{R_{P31}^{N-1} + R_O^{N-1}} \dot{i}_{y1}^{N-1} - R_{P32}^{N-1} \dot{i}_{y2}^{N-1} - (Z_{22}^{N-1} + Z_{M22}^{N-1}) \dot{i}_{22}^{N-1} + \\ + Z_{Дi} \dot{i}_{Дi} = 0; \\ (Z_{11}^N + Z_{M11}^N) \dot{i}_{11}^N + (Z_{21}^{N-1} + Z_{M21}^{N-1}) \dot{i}_{21}^{N-1} + \frac{R_{P31}^{N-1} R_O^{N-1}}{R_{P31}^{N-1} + R_O^{N-1}} \dot{i}_{y1}^{N-1} - \frac{R_{P31}^N R_O^N}{R_{P31}^N + R_O^N} \dot{i}_{y1}^N = \\ = 0; \\ (Z_{12}^N + Z_{M12}^N) \dot{i}_{12}^N + (Z_{22}^{N-1} + Z_{M22}^{N-1}) \dot{i}_{22}^{N-1} + R_{P32}^{N-1} \dot{i}_{y2}^{N-1} - R_{P32}^N \dot{i}_{y2}^N = 0; \\ (Z_{21}^N + Z_{M21}^N) \dot{i}_{21}^N + \frac{R_{P31}^N R_O^N}{R_{P31}^N + R_O^N} \dot{i}_{y1}^N - R_{P32}^N \dot{i}_{y2}^N - (Z_{22}^N + Z_{M22}^N) \dot{i}_{22}^N = 0. \end{array} \right. \quad (2.22)$$

По первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_{21}^{N-1} = \dot{I}_{11}^N + \dot{I}_{д1}; \quad \dot{I}_{22}^{N-1} = \dot{I}_{12}^N - \dot{I}_{д1}; \quad (2.23)$$

Затем в систему уравнений (2.22) подставляются формулы (2.7) – (2.9), (2.11), (2.21) и (2.23), а дальнейшие расчёты проводятся по методике, приведённой в пункте 2.4.

Сравнивая результаты расчёта величины асимметрии тягового тока на перегоне с уравнивающими дросселями и на перегоне без них, можно сделать вывод о целесообразности применения таких дросселей.

2.6 Проверка корректности разработанной методики

В качестве примера использования разработанной методики решим задачу определения коэффициента асимметрии тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по однопутному перегону в точке на расстоянии 2 км от выходного ДТ.

Исходные данные:

- тяговый ток частотой $f_{\Gamma} = 50$ Гц величиной $I_{\Gamma} = 300$ А;
- температура рельсов $+ 20^{\circ}\text{C}$;
- удельное сопротивление рельсовых нитей при тяговом токе в рельсовой линии 300 А $z_{\text{РН}} = 0,45 e^{j53^{\circ}}$ Ом/км;
- взаимная индуктивность рельсовых нитей на частоте 50 Гц $M_{12} = 1,44$ мГн/км;
- удельное поперечное сопротивление рельсов $r_{\text{РЗ}} = 1,5$ Ом·км;
- удельное сопротивление цепей заземления контактных опор на рельс $r_0 = 5$ Ом·км;
- сопротивление отсасывающей линии тяговой подстанции $R_{\text{ОЛ}} = 0,5$ Ом; сопротивление цепей заземления тяговой подстанции $R_{\text{ЗП}} = 1,0$ Ом; сопротивления

секций основной обмотки ДТ $Z_{\text{ДТ}} = 0,25 e^{j90^\circ}$ Ом для тягового тока частотой 50 Гц; сопротивления дроссельных перемычек $Z_{\text{ДП}}$ взяты равными 0,05 Ом.

Согласно таблице Б.1 (Приложение Б) предельно допустимая длина отрезка рельсовой линии при удельном поперечном сопротивлении рельсов 1,5 Ом·км и погрешности моделирования 5 % составляет 1 км. Следовательно, в целях решения рельсовую линию можно разделить на два равных отрезка (рисунок 2.3), длина которых $l_{\text{рл}}^A = l_{\text{рл}}^B = 1,0$ км.

С учётом исходных данных рассчитаем значения всех элементов, показанных на рисунке 2.4. Сопротивления отрезков рельсовых нитей, входящих в продольные плечи трёхполюсников, моделирующих отрезки A и B рельсовой линии рассчитываются по формуле (2.1):

$$Z_{11}^A = Z_{21}^A = Z_{12}^A = Z_{22}^A = Z_{11}^B = Z_{21}^B = Z_{12}^B = Z_{22}^B = 0,5 \cdot 0,45 e^{j53^\circ} \cdot 1,0 = 0,225 e^{j53^\circ} \text{ Ом.}$$

По формуле (2.3) найдём удельное магнитное сопротивление рельсовых нитей на частоте 50 Гц:

$$z_{\text{М}} = j100\pi \cdot 1,44 \cdot 10^{-3} = j0,452 \text{ Ом/км.}$$

Найденное значение подставим в формулу (2.2) для определения величины магнитных сопротивлений рельсовых нитей, которые при первой итерации расчёта одинаковы у трёхполюсников, моделирующих равные отрезки рельсовой линии:

$$Z_{\text{М}} = 0,5 \cdot j100\pi \cdot 1,44 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0 = j0,226 \text{ Ом.}$$

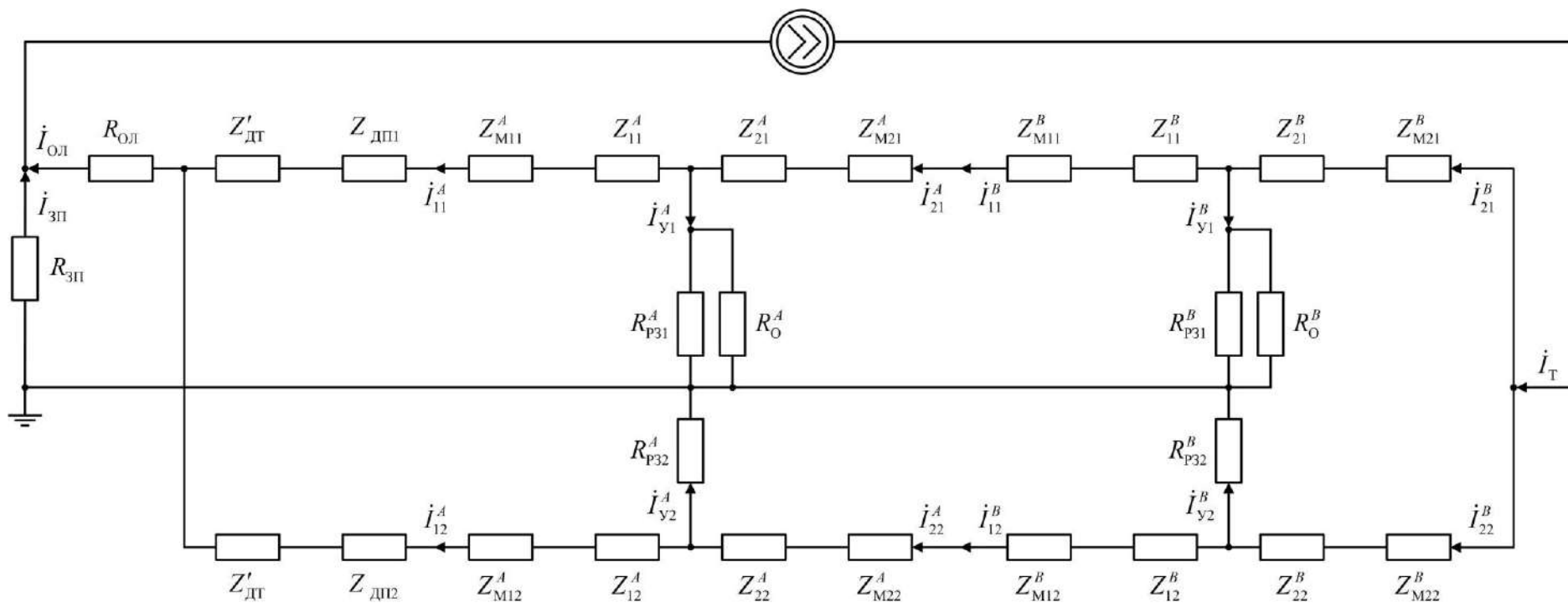


Рисунок 2.4 – Модель тяговой рельсовой линии при вступлении поезда на отрезок B

Поперечные сопротивления рельсовых нитей рассчитаем по формуле (2.4):

$$R_1^A = R_2^A = R_1^B = R_2^B = \frac{1,5}{1,0} = 1,5 \text{ Ом}, \quad R_O^A = R_O^B = \frac{5,0}{1,0} = 5,0 \text{ Ом}.$$

Рассматриваемая рельсовая линия разделена на два отрезка, поэтому число уравнений, входящих в систему по второму закону Кирхгофа равно пяти:

$$\left\{ \begin{array}{l} (Z'_{\text{дт}} + Z_{\text{дп1}} + Z_{11}^A + Z_{\text{М11}}^A) \dot{I}_{11}^A + R_{\text{ол}} \dot{I}_{\text{ол}} - R_{3\text{п}} \dot{I}_{3\text{п}} - \frac{R_{\text{п31}}^A R_O^A}{R_{\text{п31}}^A + R_O^A} \dot{I}_{\text{y1}}^A = 0; \\ (Z'_{\text{дт}} + Z_{\text{дп2}} + Z_{12}^A + Z_{\text{М12}}^A) \dot{I}_{12}^A + R_{\text{ол}} \dot{I}_{\text{ол}} - R_{3\text{п}} \dot{I}_{3\text{п}} - R_{\text{п32}}^A \dot{I}_{\text{y2}}^A = 0; \\ (Z_{11}^B + Z_{\text{М11}}^B) \dot{I}_{11}^B + (Z_{21}^A + Z_{\text{М21}}^A) \dot{I}_{21}^A + \frac{R_{\text{п31}}^A R_O^A}{R_{\text{п31}}^A + R_O^A} \dot{I}_{\text{y1}}^A - \frac{R_{\text{п31}}^B R_O^B}{R_{\text{п31}}^B + R_O^B} \dot{I}_{\text{y1}}^B = 0; \\ (Z_{12}^B + Z_{\text{М12}}^B) \dot{I}_{12}^B + (Z_{22}^A + Z_{\text{М22}}^A) \dot{I}_{22}^A + R_{\text{п32}}^A \dot{I}_{\text{y2}}^A - R_{\text{п32}}^B \dot{I}_{\text{y2}}^B = 0; \\ (Z_{21}^B + Z_{\text{М21}}^B) \dot{I}_{21}^B + \frac{R_{\text{п31}}^B R_O^B}{R_{\text{п31}}^B + R_O^B} \dot{I}_{\text{y1}}^B - R_{\text{п32}}^B \dot{I}_{\text{y2}}^B - (Z_{22}^B + Z_{\text{М22}}^B) \dot{I}_{22}^B = 0. \end{array} \right. \quad (2.24)$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа составим девять уравнений. Для этого выразим токи утечки через токи в рельсовых нитях для отрезков рельсовой линии A и B :

$$\dot{I}_{\text{y1}}^A = \dot{I}_{21}^A - \dot{I}_{11}^A; \quad \dot{I}_{\text{y2}}^A = \dot{I}_{22}^A - \dot{I}_{12}^A; \quad \dot{I}_{\text{y1}}^B = \dot{I}_{21}^B - \dot{I}_{11}^B; \quad \dot{I}_{\text{y2}}^B = \dot{I}_{22}^B - \dot{I}_{12}^B. \quad (2.25)$$

Токи в рельсовых нитях, втекающие в отрезок A , равны токам, вытекающим из отрезка B :

$$\dot{I}_{21}^A = \dot{I}_{11}^B; \quad \dot{I}_{22}^A = \dot{I}_{12}^B. \quad (2.26)$$

Для расчётной схемы справедливы ещё три формулы:

$$\dot{I}_{\text{т}} = \dot{I}_{\text{ол}} + \dot{I}_{3\text{п}}; \quad \dot{I}_{\text{ол}} = \dot{I}_{11}^A + \dot{I}_{12}^A; \quad \dot{I}_{\text{т}} = \dot{I}_{21}^B + \dot{I}_{22}^B. \quad (2.27)$$

Коэффициент асимметрии тягового тока под приёмными локомотивными катушками АЛС при вступлении поезда на отрезок рельсовой линии B :

$$k_{AI}^{ALC} = \frac{|\dot{I}_{21}^B - \dot{I}_{22}^B|}{\dot{I}_{21}^B + \dot{I}_{22}^B}. \quad (2.28)$$

Решение системы найдено с использованием математического программного обеспечения для инженерных расчётов Mathcad 15 [77]. Листинг программы и результаты её расчёта приведены в Приложении В.

Найденные после первой итерации расчётов значения токов и проверка правильности полученных результатов по первому закону Кирхгофа приведены в Приложении Г (таблица Г.1).

Также проверка корректности разработанной методики была проведена измерением токов в элементах схемы (рисунке 2.4) с использованием среды виртуального моделирования Multisim 13. Для коэффициента асимметрии тягового тока расхождение результатов моделирования составило 0,6%. Данная погрешность объясняется округлением результатов средой моделирования Multisim 13. Она растёт с увеличением количества моделируемых элементов. Собранная схема и результаты моделирования показаны на рисунке Д.1 (Приложение Д).

Таким образом, моделирование целесообразнее производить с использованием программы, написанной в Mathcad 15, с проведением предварительной проверки корректности данной программы путём сравнения результатов расчёта с результатами моделирования в Multisim 13.

Второй шаг расчёта заключается в определении изменения падения напряжения на магнитных сопротивлениях, прямо пропорционального отношению протекающих по ним токов, по формулам (2.14) и (2.15).

Система уравнений принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(Z'_{дГ} + Z_{дП1} + Z_{11}^A + r_{11}^A Z_{M11}^A \right) \dot{I}_{11}^A + R_{ОЛ} \dot{I}_{ОЛ} - R_{3П} \dot{I}_{3П} - \frac{R_{P31}^A R_O^A}{R_{P31}^A + R_O^A} \dot{I}_{y1}^A = 0; \\ \left(Z'_{дГ} + Z_{дП2} + Z_{12}^A + r_{12}^A Z_{M12}^A \right) \dot{I}_{12}^A + R_{ОЛ} \dot{I}_{ОЛ} - R_{3П} \dot{I}_{3П} - R_{P32}^A \dot{I}_{y2}^A = 0; \\ \left(Z_{11}^B + r_{11}^B Z_{M11}^B \right) \dot{I}_{11}^B + \left(Z_{21}^A + r_{21}^A Z_{M21}^A \right) \dot{I}_{21}^A + \frac{R_{P31}^A R_O^A}{R_{P31}^A + R_O^A} \dot{I}_{y1}^A - \frac{R_{P31}^B R_O^B}{R_{P31}^B + R_O^B} \dot{I}_{y1}^B = 0; \\ \left(Z_{12}^B + r_{12}^B Z_{M12}^B \right) \dot{I}_{12}^B + \left(Z_{22}^A + r_{22}^A Z_{M22}^A \right) \dot{I}_{22}^A + R_{P32}^A \dot{I}_{y2}^A - R_{P32}^B \dot{I}_{y2}^B = 0; \\ \left(Z_{21}^B + r_{21}^B Z_{M21}^B \right) \dot{I}_{21}^B + \frac{R_{P31}^B R_O^B}{R_{P31}^B + R_O^B} \dot{I}_{y1}^B - R_{P32}^B \dot{I}_{y2}^B - \left(Z_{22}^B + r_{22}^B Z_{M22}^B \right) \dot{I}_{22}^B = 0. \end{array} \right. \quad (2.29)$$

После подстановки в систему уравнений (2.29) формул (2.25) – (2.27) найдены величины всех токов в схеме, а затем определено итоговое значение коэффициента асимметрии тягового тока. Найденные с использованием Mathcad 15 значения, а также проверка правильности полученных результатов по первому закону Кирхгофа приведены в Приложении Г (таблица Г.2).

2.7 Выводы по главе

1. Разработана расчётная модель рельсовой линии тяговой рельсовой сети на базе трёхполюсников (Т-образных схем замещения), обеспечивающая возможность исследовать процессы растекания тягового тока по элементам неоднородной рельсовой линии и анализировать влияние состояния данных элементов на величину асимметрии тягового тока в местах подключения аппаратуры рельсовых цепей, а также под катушками АЛС при движении поезда по участкам с РЦ, оборудованными изолирующими стыками, и по перегону с ТРЦ, как оборудованному уравнивающими дросселями, так и без них.

2. Приведена методика математического моделирования, позволяющая учесть изменения продольных и поперечных сопротивлений рельсовых нитей в разных условиях эксплуатации. При расчётах учитывают зависимости сопротивлений рельсов от их температуры и величины тягового тока в них.

3. Предложена методика расчёта, позволяющая находить тяговые токи на частотах, создающих помехи, во всех ветвях эквивалентной схемы замещения рельсовой линии путём составления систем уравнений по законам Кирхгофа. В предложенной методике учитывается возрастание величины асимметрии тягового тока из-за влияния взаимной индуктивности рельсовых нитей, что позволяет использовать данную методику в различных условиях эксплуатации.

4. Разработана методика, позволяющая количественно оценивать степень снижения асимметрии тягового тока уравнивающими дросселями в рельсовых нитях перегонных бесстыковых рельсовых цепей.

5. Создана программа, позволяющая на основе разработанной методики выполнять расчет помех от тягового тока в неоднородной рельсовой линии с использованием математического программного обеспечения для инженерных расчётов Mathcad 15.

6. Проверена корректность разработанной методики путём сравнения результатов, полученных расчётным путём, с результатами виртуального моделирования в Multisim 13.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ ОТ ПЕРЕМЕННОГО ТЯГОВОГО ТОКА НА АППАРАТУРУ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

3.1 Цели и задачи исследования

Целью исследования является определение уровней помех от гармоник тягового тока в рельсовых линиях, влияющих на работу аппаратуры РЦ и АЛСН. Задачи исследования – найти распределение асимметрии гармоник тягового тока по длине рельсовых линий, оборудованных кодовыми РЦ частотой 25 Гц, при разных состояниях их токопроводящих и изолирующих элементов, разных величин тягового тока в них и разных температурах окружающей среды.

В соответствии с нормами [8] эти РЦ могут быть длиной от меньше, чем 500 м, до 2,6 км. На перегонах с интенсивным движением поездов наиболее вероятно для таких РЦ длина не более 1,5 км. Эта длина и использована в данных исследованиях.

Переменный тяговый ток в рельсах может содержать значимые токи гармоник частоты 50 Гц вплоть до 21-й [104]. Современные фильтры в приёмной аппаратуре РЦ и АЛС относительно успешно ослабляют токи гармоник, но на их выходах остаются сигналы помех от переменного тягового тока с частотами 50 Гц и 150 Гц [97], действие которых и вызывает сбои в работе приёмников сигналов. Первая гармоника близка к системе АЛСН и к РЦ, работающим на частоте 25 Гц. Третья гармоника с частотой 150 Гц близка к несущей частоте системы АЛС-ЕН, равной $174,8 \pm 0,1$ Гц. Поэтому исследования проводились с токами на этих частотах.

Продольное сопротивление рельсовых нитей увеличивается с ростом частоты тока, текущего по ним. Например, на частоте 150 Гц это сопротивление больше в два с лишним раза по сравнению с их сопротивлением на частоте 50 Гц [111]. Токи более высоких частот стекает в землю интенсивнее и быстрее затухают по длине рельсовой линии. В результате величина асимметрии более высоких гармоник тягового тока под катушками АЛС и в местах подключения аппаратуры РЦ

отличается от асимметрии тягового тока на частоте 50 Гц. Это учитывалось при проведении исследований.

По результатам исследований сотрудниками Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) и Отраслевого центра внедрения новой техники и технологий ОАО «РЖД» (АО «ОЦВ») на Восточно-Сибирской и Красноярской железных дорогах установлено, что составляющая частотой 150 Гц может составлять до 40% в переменном тяговом токе в рельсах. Величина составляющих тягового тока в рельсах на других гармониках тоже может быть значимой. Поэтому задачами данных исследований являются:

1. Определить характер изменения асимметрии составляющих тягового тока с частотами 50 Гц и 150 Гц при разных температурах окружающей среды в местах подключения к рельсам приёмников РЦ, ограниченных изолирующими стыками, в зависимости от состояния токопроводящих и изолирующих элементов рельсовых линий.

2. Определить характер изменения асимметрии составляющих тягового тока с частотами 50 Гц и 150 Гц при разных температурах окружающей среды под приёмными локомотивными катушками АЛС при движении поезда по перегону с однородными и неоднородными рельсовыми линиями, оборудованному кодовыми РЦ частотой 25 Гц с дроссель-трансформаторами, в зависимости от состояния токопроводящих и изолирующих элементов рельсовых линий.

3. Определить характер изменения асимметрии составляющих тягового тока с частотами 50 Гц и 150 Гц при разных температурах окружающей среды под приёмными локомотивными катушками АЛС при движении поезда по перегону с бесстыковыми РЦ и уравнивающими дросселями и без них в зависимости от состояния токопроводящих и изолирующих элементов рельсовых линий.

4. Количественно оценить снижение величины асимметрии тягового тока в рельсовых нитях при использовании бесстыковых РЦ, оборудованных уравнивающими дросселями и без таких дросселей.

3.2 Выбор исходных данных для исследований

Исследования проводились при рельсах типа Р65 и их температуре от $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Удельное сопротивление одной рельсовой нити при исправном состоянии её элементов при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ гармонике переменного тягового тока частотой 50 Гц равно $0,4e^{j65,0^{\circ}}$ Ом/км [8], а гармонике частотой 150 Гц равно $0,89e^{j71,0^{\circ}}$ Ом/км [104].

Увеличение значения удельного сопротивления рельсовой нити при повышении температуры рельсов и/или роста тягового тока в них учитывалось с использованием зависимостей, приведённых в пункте 1.2. По формулам (1.7 – 1.10) расчётное удельное сопротивление рельсовых нитей в звеньевом пути при тяговом токе в рельсовой линии 300 А частотой 50 Гц и при температуре рельсов $+20^{\circ}\text{C}$ $z_{\text{РН}} = 0,45 e^{j53^{\circ}}$ Ом/км. По формуле (1.11) при температуре -10°C $z_{\text{РН}} = 0,39 e^{j53^{\circ}}$ Ом/км, а при температуре -40°C $z_{\text{РН}} = 0,32 e^{j53^{\circ}}$ Ом/км. При тяговом токе в рельсовой линии 120 А частотой 150 Гц при температуре рельсов $+20^{\circ}\text{C}$ удельное сопротивление рельсовых нитей $z_{\text{РН}} = 0,90 e^{j71^{\circ}}$ Ом/км, при температуре -10°C $z_{\text{РН}} = 0,78 e^{j71^{\circ}}$ Ом/км, а при температуре -40°C $z_{\text{РН}} = 0,65 e^{j71^{\circ}}$ Ом/км.

Удельное сопротивление рельсов по отношению к земле варьировалось от минимального, равного $r_{\text{рз}} = 0,5$ Ом·км, до максимального, равного $r_{\text{рз}} = 18,0$ Ом·км [41].

Расчёты выполнялись при условии, что к одной из рельсовых нитей в среднем через каждые 50 м подключены цепи заземления опор контактной сети и других конструкций, величина входных сопротивлений которых R_0 в исправном состоянии должна быть не меньше 100 Ом [37]. На практике большинство заземлителей не соответствует данным требованиям [111], и при моделировании средняя величина входных сопротивлений у всех подключенных к рельсам цепей заземления взята по 80 Ом. Тогда удельное сопротивление изоляции заземлений контактных

опор $r_0 = 80 \cdot 0,05 = 4 \text{ Ом} \cdot \text{км}$. В этом случае при сопротивлении рельсов по отношению к земле, равном $0,5 \text{ Ом} \cdot \text{км}$, коэффициент поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей $k_{AZ}^{\text{ПП}} = 0,0588$.

Такую же величину коэффициента продольной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей $k_{AZ}^{\text{ПП}} = 0,0588$ обеспечивают значения модулей удельных продольных сопротивлений рельсовых нитей $0,424 \text{ Ом/км}$ и $0,376 \text{ Ом/км}$ при температуре $+20 \text{ }^\circ\text{C}$, и $0,306 \text{ Ом/км}$ и $0,272 \text{ Ом/км}$ при температуре $-40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Сопротивление отсасывающей линии тяговой подстанции $R_{\text{ОЛ}}$ принято равным $0,5 \text{ Ом}$. Сопротивление цепей заземления тяговой подстанции $R_{\text{ЗП}}$ изменяется в диапазоне от $0,5 \text{ Ом}$ до $5,0 \text{ Ом}$ [56]. В компьютерных экспериментах данной диссертационной работы принято $R_{\text{ЗП}} = 1,0 \text{ Ом}$.

Сопротивления основных обмоток дроссель-трансформатора типа ДТ-1-150 и ДТ-1-300 для первой гармоники переменного тягового тока 50 Гц равны $Z_{\text{ДТ}} = 1,0 e^{j90^\circ} \text{ Ом}$, а для третьей – $Z_{\text{ДТ}} = 3,0 e^{j90^\circ}$. Однако из-за встречного протекания тяговых токов по секциям основных обмоток ДТ сопротивления секций его основных обмоток для тягового тока для данных ДТ равны $0,25 Z_{\text{ДТ}}$ [21].

Сопротивления дроссельных перемычек $Z_{\text{ДП}}$ не должно превышать $0,1 \text{ Ом}$ [79] и приняты равными $0,05 \text{ Ом}$.

Взаимная индуктивность рельсовых нитей на частоте первой гармоники тягового тока частотой 50 Гц $M_{12} = 1,44 \text{ мГн/км}$, а на частоте третьей гармоники 150 Гц $M_{12} = 1,33 \text{ мГн/км}$ [48]. Следовательно, на частоте первой гармоники с учетом формулы (2.3) удельное сопротивление взаимной индуктивности рельсовых нитей $z_M = 0,452 \text{ Ом/км}$, а на частоте третьей $z_M = 1,253 \text{ Ом/км}$.

3.3 Изменения величины тягового тока по длине рельсовой нити

Абсолютное значение асимметрии тягового тока под локомотивными катушками АЛС или в месте подключения к рельсам приёмников РЦ прямо пропорционально величине тягового тока в данном месте рельсовой линии. Поэтому интересным является анализ того, как распределяется тяговый ток по длине рельсовой линии.

Тяговый ток стекает из рельсов в землю, отчего его величина в рельсах снижается при удалении от места его втекания. Относительная величина первой гармоники тягового тока частотой 50 Гц при изменении величины поперечного удельного сопротивления рельсов от максимальной до минимальной изменяется по длине рельсовой нити в заштрихованной области, показанной на рисунке 3.1. За начало рельсовой нити принято место втекания в неё тягового тока. Результаты получены для перегона, оборудованного бесстыковыми РЦ, при использовании [76, 77].

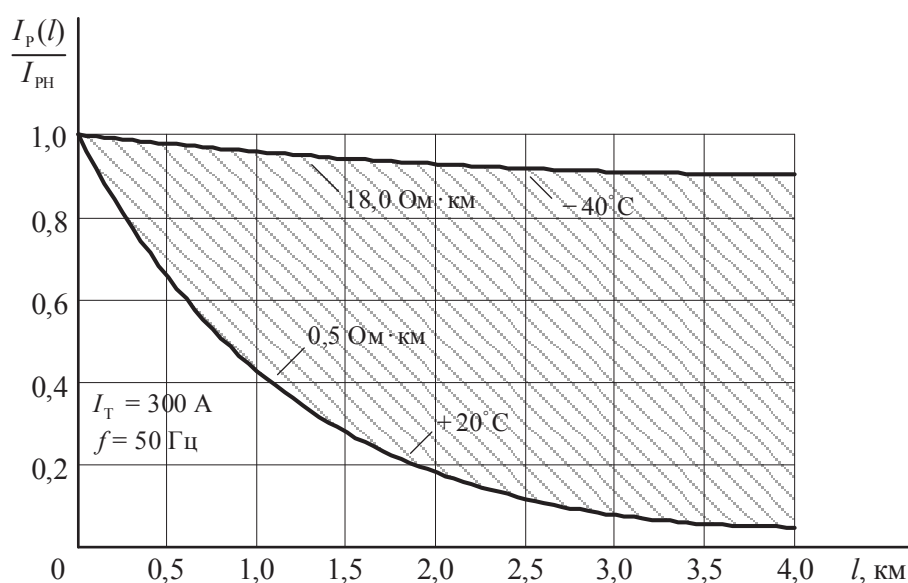


Рисунок 3.1 – Зависимость относительной величины первой гармоники тягового тока в рельсовой нити от расстояния до точки его втекания на перегоне без ДТ

На рисунке приняты следующие обозначения:

$I_p(l)$ – величина переменного тягового тока в рельсовой нити на расстоянии l от её начала;

I_{PH} – величина гармоника переменного тягового тока частотой 50 Гц в начале рельсовой нити, принятая при моделировании 300 А.

Интенсивность стекания тягового тока из рельсовой нити в землю увеличивается при снижении значения сопротивления рельсов по отношению к земле. Так, при максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле величина первой гармоники тягового тока в конце рельсовой нити длиной 1,5 км составляет 94 % от его величины в начале рельсовой нити, а при минимальном сопротивлении это значение снижается до 28%. При минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле на расстоянии порядка 2,7 км от начала рельсовой линии до 90 % первой гармоники тягового тока утекает из рельсовой нити в землю.

На участках, оборудованных РЦ с изолирующими стыками, сопротивления основных обмоток ДТ, установленных возле этих изолирующих стыков, увеличивают продольное сопротивление рельсовых нитей. В результате гармоники тягового тока быстрее стекают из рельсов в землю.

На рисунке 3.2 показан характер уменьшения относительной величины первой гармоники тягового тока в рельсах по длине рельсовой нити, разделенной через каждые 1,5 км изолирующими стыками с ДТ типов ДТ-1-150 или ДТ-1-300.

Возрастание продольного сопротивления рельсовой нити за счёт сопротивлений основных обмоток ДТ приводит к смещению точки, в которой утечка первой гармоники тягового тока из рельсовой нити в землю при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле составляет 90 %, на расстояние, равное 2,24 км. На расстоянии 1,5 км от места втекания тягового тока его величина при максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле составляет 91 % от величины в начале рельсовой нити, а при минимальном – 20 %.

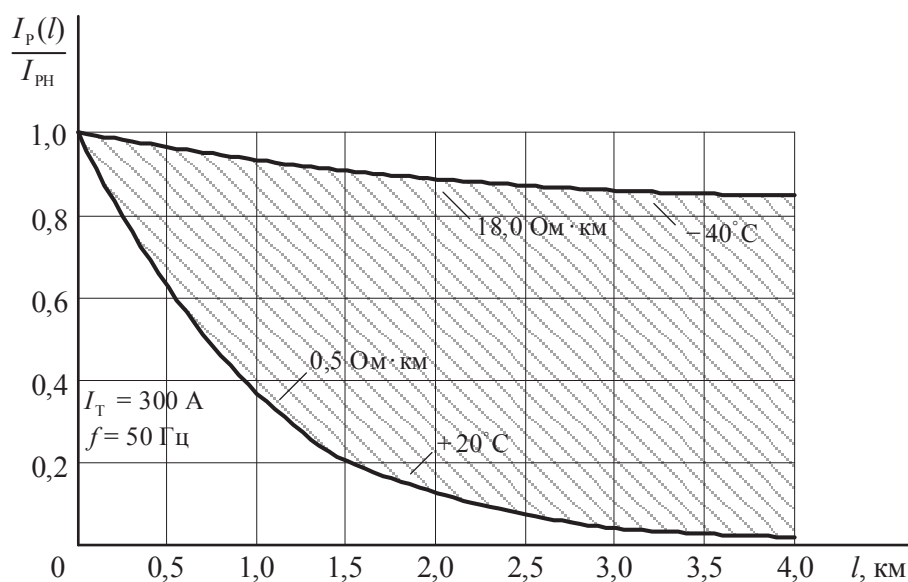


Рисунок 3.2 – Зависимость относительной величины первой гармоники тягового тока в рельсовой нити с ДТ через 1,5 км от расстояния до точки его втекания

С ростом частоты гармоники тягового тока увеличивается интенсивность стекания его из рельсов в землю. Это видно из рисунков 3.3 и 3.4, полученных при величине тока третьей гармоники 120 А. Рисунок 3.3 получен при бесстыковой рельсовой линии без ДТ, а рисунок 3.4 – для рельсовой линии длиной 1,5 км с ДТ типа ДТ-1-150 или ДТ-1-300.

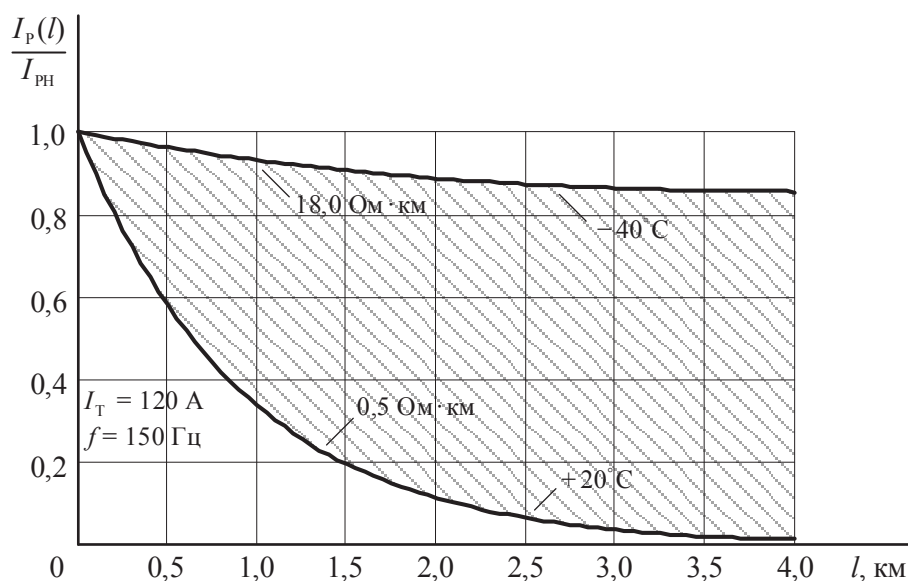


Рисунок 3.3 – Зависимость относительной величины третьей гармоники тягового тока в рельсовой нити от расстояния до точки его втекания на перегоне без ДТ

Увеличение частоты тягового тока в три раза с первой до третьей гармоники ускоряет его стекание из рельсовой нити в землю при отсутствии изолирующих стыков в рельсовой линии в 1,5 раза, а из рельсовой нити, когда рельсовая линия через 1,5 км разделена изолирующими стыками с ДТ, в 1,8 раза.

Расстояние, на котором утечка третьей гармоникой тягового тока из рельсовой нити в землю при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле составляет 90 % от её величины в начале рельсовой нити, равно 2,17 км для рельсовой нити, оборудованной бесстыковыми РЦ. Это расстояние равно 1,50 км для рельсовой нити, разделенной изолирующими стыками с ДТ типов ДТ-1-150 или ДТ-1-300, установленными каждые 1,5 км.

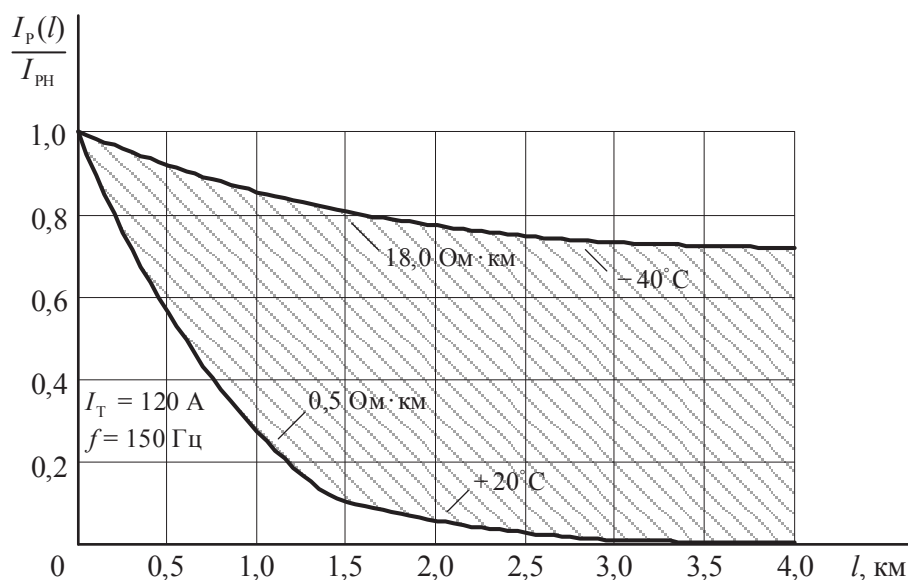


Рисунок 3.4 – Зависимость относительной величины третьей гармоники тягового тока в рельсовой нити с ДТ через 1,5 км от расстояния до точки его втекания

Утечка переменного тягового тока из рельсов в землю вызывает увеличение тягового тока в рассматриваемой точке рельсовой линии по мере приближения к ней поезда. На рисунке 3.5 показан рост величины первой гармоники тягового тока при удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле $0,5 \text{ Ом} \cdot \text{км}$.

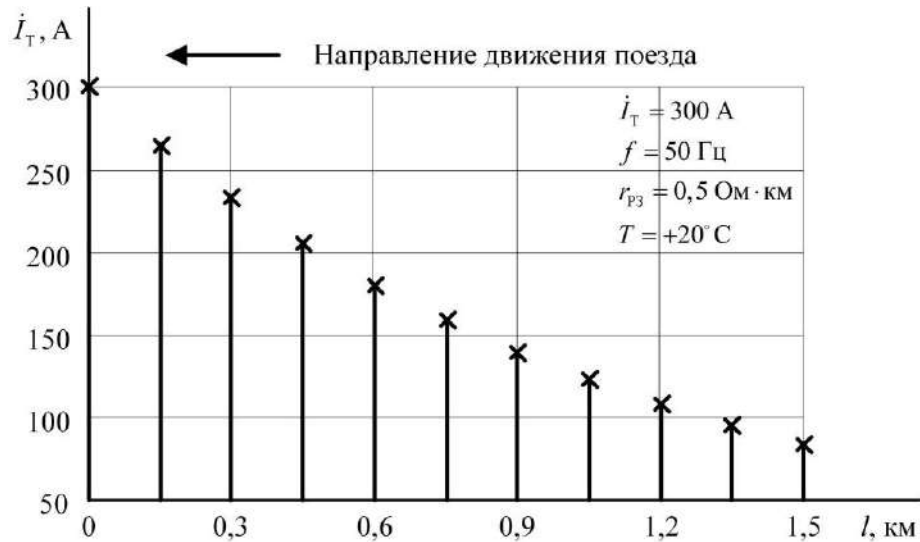


Рисунок 3.5 – Изменение величины первой гармоники переменного тягового тока при приближении поезда к выбранной точке

Таким образом, при небольших значениях продольного сопротивления рельсовых линий величина асимметрии тягового тока в рельсовой линии определяется, прежде всего, асимметрией поперечных сопротивлений рельсовых нитей. С ростом сопротивлений рельсовых нитей по отношению к земле на величину асимметрии тягового тока всё большее влияние оказывает продольная асимметрия их сопротивлений.

3.4 Асимметрия переменного тягового тока на релейном конце рельсовой цепи, ограниченной изолирующими стыками

Перекрытие светофора на запрещающее показание перед движущимся поездом приводит к срабатыванию режима экстренного торможения, которое прервать нельзя. Причина такого перекрытия считается опасной. Эта ситуация часто возникает около входных светофоров в горловинах станций, где расположена тяговая подстанция. Ток в рельсах здесь всегда большой, и если в первой РЦ за светофором ток от приближающегося поезда растёт, то уровень помех на путевой приёмник этой РЦ может превысить допустимые пределы при увеличении тягового тока в рельсах токов.

Для исследований были выбраны две одинаковые РЦ, ограниченные изолирующими стыками и примыкающие к тяговой подстанции. Приводятся результаты исследований изменения асимметрии тягового тока на входном конце РЦ, примыкающей к тяговой подстанции, при приближении к нему головы поезда по предыдущей РЦ.

Рассматривается рельсовая линия, у которой продольные сопротивления рельсовых нитей одинаковы и по длине РЦ не меняются. На рисунке 3.6 показано изменение асимметрии первой гармоники тягового тока на входном конце РЦ при приближении к нему поезда по предыдущей РЦ. По мере приближения поезда к рассматриваемой РЦ в соответствии с данными п. 3.3 величина тягового тока на её входном конце растёт. Следовательно, растёт и абсолютная величина его асимметрии в месте подключения к рельсам аппаратуры РЦ.

Исследования показали, что при максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле утечка тягового тока из рельсов в землю невелика, отчего абсолютная величина асимметрии первой гармоники тягового тока на входном конце РЦ увеличивается незначительно и не превышает значения, равного 1,4 А при тяговом токе в рельсовой линии 300 А (рисунок 3.6).

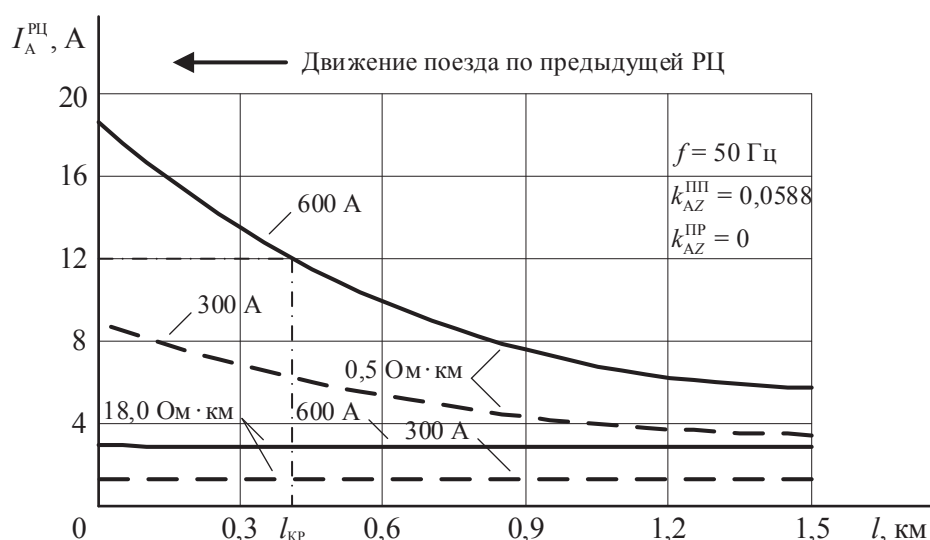


Рисунок 3.6 – Изменение асимметрии первой гармоники тягового тока на входном конце РЦ при приближении к ней поезда

С уменьшением сопротивления рельсов по отношению к земле утечка тягового тока из рельсов в землю через цепи заземления растёт, и увеличивается абсолютное значение асимметрии тягового тока. Так, при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле, температуре рельсов $+20^{\circ}\text{C}$ и тяговом токе в рельсах величиной 300 А ток асимметрии на входном конце смежной РЦ при вступлении поезда на предыдущую РЦ составляет 3,6 А, а по мере приближения поезда возрастает до 8,9 А.

Допустимая величина асимметрии тягового тока принята равной 12 А. Таким образом, в рассматриваемых условиях тяговый ток в рельсах величиной 300 А не приводит к превышению уровня помех допустимой величины.

При движении тяжеловесных поездов величина тягового тока в рельсах возрастает, вследствие чего увеличивается и абсолютная величина его асимметрии. Сравнение кривых, полученных при тяговом токе 300 А и 600 А, показало, что зависимость величины тока асимметрии на входном конце РЦ от величины тягового тока в рельсах не является прямой пропорциональностью. Это объясняется тем, что при возрастании величины тягового тока увеличивается активное сопротивление рельсов, что изменяет значение коэффициента входных сопротивлений рельсовых нитей и скорость стекания тягового тока из рельсов в землю.

При тяговом токе 600 А и минимальном удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле величина асимметрии первой гармоники тягового тока на входном конце РЦ увеличивается до допустимой величины 12 А при приближении поезда на расстояние 0,41 км.

3.5 Асимметрия тягового тока в однородной рельсовой линии с изолирующими стыками

В проводимых ранее исследованиях не учитывалось влияние взаимной индуктивности рельсовых нитей [111]. В данных исследованиях это влияние учтено.

Рассматривается рельсовая линия, обладающая только поперечной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей. В кодовой РЦ с указанными в п. 3.2 параметрами при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле и температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, значении первой гармоники тягового тока 300 А и при коэффициенте асимметрии $0,030$ абсолютная величина асимметрии в начале РЦ была равна $8,9\text{ А}$. В её конце она составляла $2,0\text{ А}$ при коэффициенте асимметрии $0,017$. Асимметрия тягового тока по длине РЦ уменьшается, причём, если в начале РЦ его величина была больше в рельсовой нити, к которой подключены цепи заземления опор контактной сети, то в конце ток стал больше в другой рельсовой нити.

С ростом сопротивлений рельсов по отношению к земле снижаются утечки тягового тока из рельсов в землю и асимметрия тягового тока в рельсовой линии. При максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле абсолютная величина асимметрии первой гармоники в начале РЦ была равна $1,2\text{ А}$ при коэффициенте асимметрии $0,004$, в конце составляла $0,8\text{ А}$ при коэффициенте асимметрии $0,0026$. Изменение температуры рельсов в таких условиях практически не влияет на величину асимметрии тягового тока в рельсовой линии. Для большей наглядности величины асимметрии тягового тока по концам РЦ при различных условиях приведены в таблицах Е.1 и Е.2 (Приложение Е).

На рисунке 3.7 приведён график изменения относительной и абсолютной величин асимметрии первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по рассматриваемой рельсовой линии.

По мере движения поезда к выходному концу РЦ длины отрезков рельсовых нитей перед ним укорачиваются, разность их входных сопротивлений уменьшается, за счёт балластного действия сопротивлений секций основных обмоток ДТ. Сопротивления дроссельных перемычек у выходного дроссель-трансформатора взяты одинаковыми. Поэтому асимметрия тягового тока под катушками АЛС на выходном конце РЦ равна нулю.

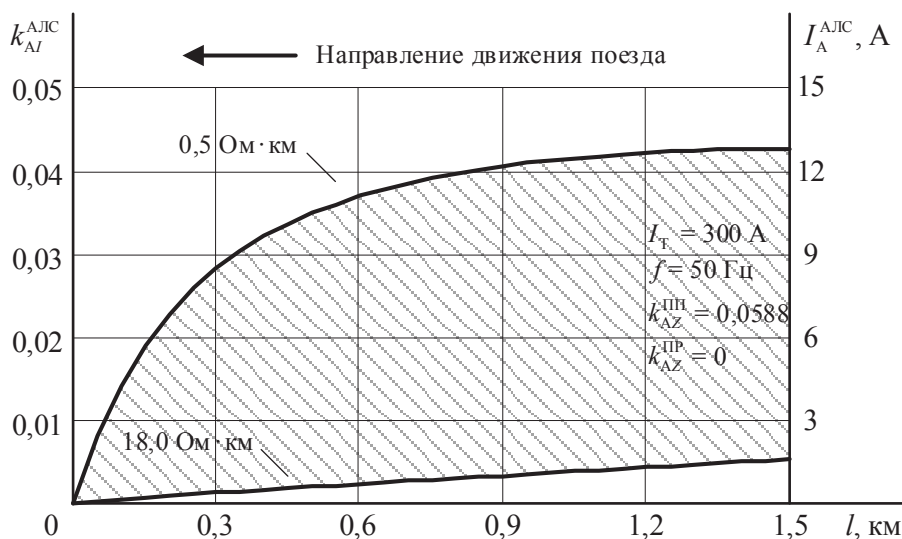


Рисунок 3.7 – Асимметрия первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по рельсовой линии, обладающей только поперечной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей

При максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле утечка тягового тока из рельсов в землю невелика. Поэтому коэффициент асимметрии первой гармоники тягового тока не превышает 0,005, а ток асимметрии не превышает 1,5 А.

С уменьшением сопротивления рельсов по отношению к земле утечка тягового тока из рельсов в землю растёт, и величина его асимметрии под катушками АЛС увеличивается. Так, при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле, температуре рельсов $+20^{\circ}\text{C}$ и вступлении поезда на РЦ коэффициент асимметрии первой гармоники тягового тока составляет 0,043, что в 1,37 раза меньше, чем коэффициент поперечной асимметрии сопротивлений. Учёт влияния взаимной индуктивности между рельсовыми нитями вызвал увеличение расчётного относительного значения данной асимметрии тягового тока в 1,2 раза.

Абсолютная величина асимметрии третьей гармоники тягового тока в тех же условиях в начале РЦ при его величине 120 А, минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле и температуре $+20^{\circ}\text{C}$ была равна 2,4 А (коэффициент асимметрии 0,020), а в её конце составляла 1,3 А (коэффициент асимметрии 0,058).

При максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле и температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ абсолютная величина асимметрии третьей гармоники в начале РЦ была равна $0,5\text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,004$), а в конце составляла $0,3\text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,0024$).

На рисунке 3.8 показан график изменения асимметрии третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС. Изменения в величинах коэффициента асимметрии тягового тока с ростом частоты гармоники вызывается тем, что удельное продольное сопротивление рельсовых нитей и сопротивления секций основных обмоток ДТ при этом растут. Это приводит к росту утечек тягового тока из рельсов в землю, которые и определяют величину асимметрии тягового тока в рельсовой линии с поперечной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей.

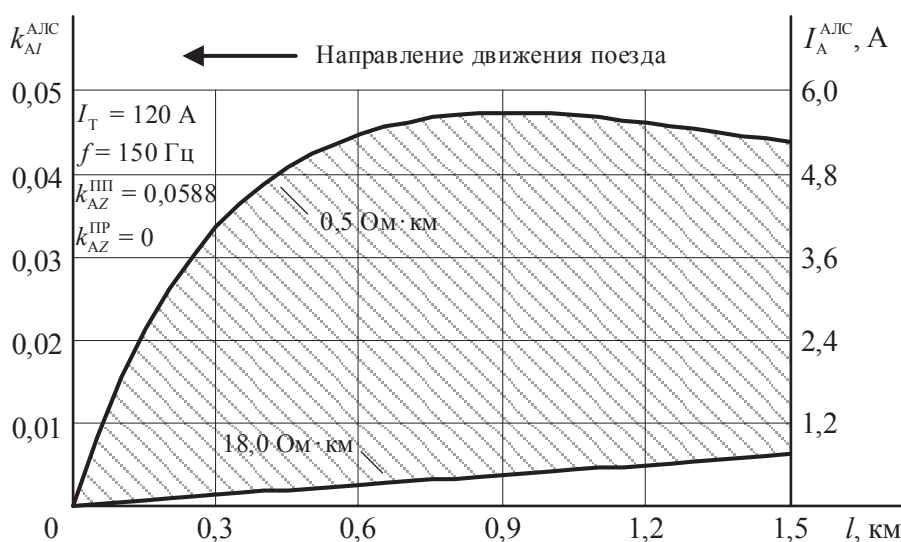


Рисунок 3.8 – Асимметрия третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по рельсовой линии, обладающей только поперечной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей

При сравнении графиков на рисунках 3.7 и 3.8 видно, что при максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле величины коэффициентов асимметрии первой и третьей гармоник тягового тока практически совпадают.

При минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле величины коэффициента асимметрии первой и третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС совпадают только при вступлении поезда на РЦ. По мере движения поезда по РЦ величина асимметрии первой гармоники убывает монотонно, а величина асимметрии третьей гармоники сначала растёт и на расстоянии 0,9 км от начала РЦ достигает максимального значения. Коэффициент асимметрии третьей гармоники в этой точке в 1,23 раза меньше коэффициента поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей.

При наличии только продольной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей асимметрия первой гармоники тягового тока по длине РЦ меняется мало, если подвижные единицы на ней отсутствуют. В рассматриваемой РЦ при температуре +20 °С асимметрия тягового тока уменьшается с 7,7 А (коэффициент асимметрии 0,026) в начале РЦ до 7,2 А (коэффициент асимметрии 0,022) в её конце. При температуре –40 °С из-за уменьшения сопротивления рельсов эта асимметрия практически не меняется по длине РЦ, оставаясь равной 11,4 А (коэффициент асимметрии 0,038).

На рисунке 3.9 приведены результаты расчёта асимметрии тягового тока под катушками АЛС при наличии только продольной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей. Мешающее влияние продольной асимметрии на работу АЛС сильнее проявляется при максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле. С ростом сопротивлений рельсов по отношению к земле увеличиваются утечки тягового тока из рельсов землю, что даёт выравнивающий эффект, и асимметрия тягового тока под катушками АЛС снижается.

Увеличение температуры рельсов приводит к росту продольных сопротивлений рельсовых нитей, а в условиях, когда данные сопротивления неодинаковы, их разность также возрастает, что приводит к увеличению асимметрии тягового тока. При вступлении поезда на РЦ, максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле и температуре +20°С коэффициент асимметрии первой гармоники тягового тока под катушками АЛС равен коэффициенту продольной асимметрии со-

противлений рельсовых нитей. При тяговом токе в 300 А ток асимметрии составляет 17,4 А, что в 1,16 раза меньше, чем при поперечной асимметрии сопротивлений такой же величины.

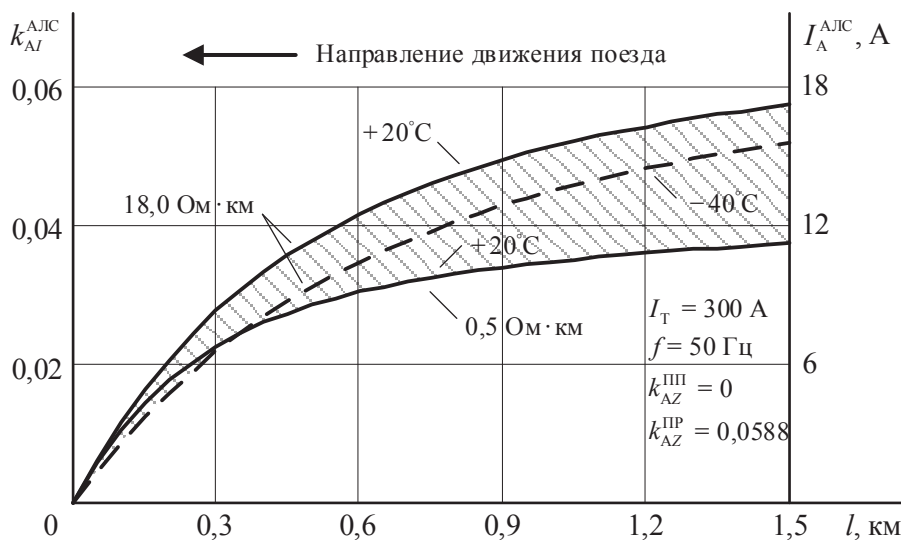


Рисунок 3.9 – Асимметрия первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по рельсовой линии, обладающей только продольной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей

При температуре $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ ток асимметрии первой гармоники под катушками АЛС в этой же точке составляет 15,6 А, что в 1,12 раза меньше, чем при температуре $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, и в 1,04 раза больше, чем при такой же температуре и поперечной асимметрии сопротивлений такой же величины.

При минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле абсолютная величина асимметрии первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при вступлении поезда на РЦ равна 11,3 А, что в 1,14 раза меньше, чем при поперечной асимметрии такой же величины.

Асимметрия третьей гармоники тягового тока по длине рассматриваемой РЦ, если подвижные единицы на ней отсутствуют, при температуре $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ уменьшается с 2,3 А (коэффициент асимметрии 0,019) в начале РЦ до 1,6 А (коэффициент асимметрии 0,064) в её конце, а при температуре $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ практически не меняется, оставаясь равной 3,6 А (коэффициент асимметрии 0,030).

Характер кривых изменения асимметрии первой и третьей гармоник тягового тока под катушками АЛС схожи, но при максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле и вступлении поезда на РЦ коэффициент асимметрии тягового тока в 1,2 раза меньше на третьей гармонике (рисунок 3.10). Когда поезд находится на расстоянии 0,3 км от выходного конца РЦ величина коэффициента асимметрии тягового тока третьей гармоники в два раза меньше по сравнению с первой гармоникой. Это объясняется тем, что при укорачивании отрезков рельсовых нитей перед головным электровозом растёт вклад сопротивлений секций основных обмоток ДТ на выходном конце во входные сопротивления рельсовых нитей.

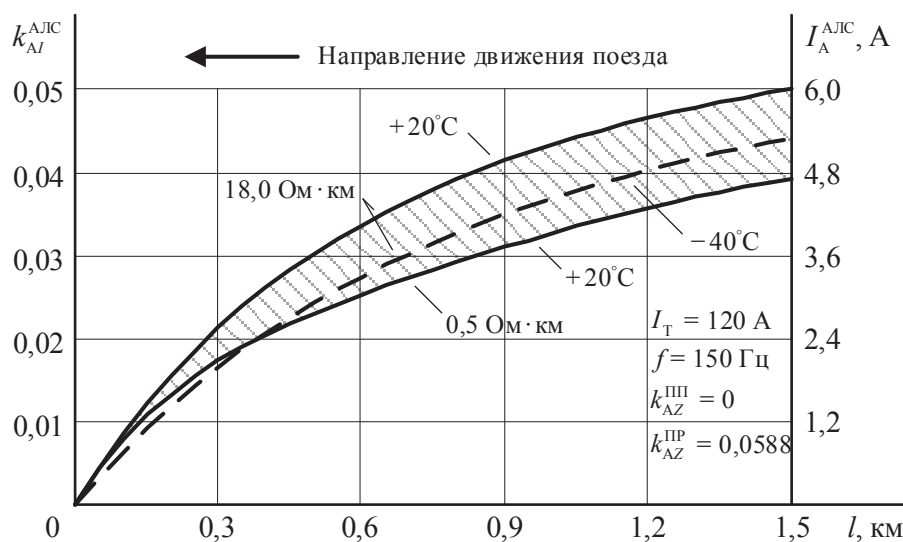


Рисунок 3.10 – Асимметрии третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по рельсовой линии с только продольной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей

Для рельсовой линии, обладающей и поперечной, и продольной асимметрией рельсовых нитей, рассмотрены два случая:

- когда цепи заземления различных конструкций на рельс подключены к рельсовой нити с меньшим продольным сопротивлением;
- когда цепи заземления различных конструкций на рельс подключены к рельсовой нити с бóльшим продольным сопротивлением.

В первом случае входное сопротивление рельсовой нити с меньшим продольным сопротивлением ещё сильнее уменьшается, что увеличивает асимметрию тягового тока. Например, при температуре рельсов $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда сопротивление рельсов по отношению к земле минимально и подвижные единицы на РЦ отсутствуют, асимметрия первой гармоники тягового тока уменьшается с $16,5\text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,055$) в начале РЦ до $5,0\text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,042$) в её конце. При температуре рельсов $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ асимметрия тягового тока в начале РЦ составляет $12,6\text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,042$) и по длине РЦ практически не меняется.

При вступлении поезда на РЦ и температуре рельсов $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ абсолютная асимметрии тягового тока в рельсах под его приёмными локомотивными катушками АЛС составляет $24,0\text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,080$) при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле и $18,6\text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,062$) при максимальном (рисунок 3.11). В сравнении со случаем, когда есть только поперечная асимметрия сопротивлений такой же величины, эти значения больше соответственно в $1,8$ раза и в $12,4$ раза.

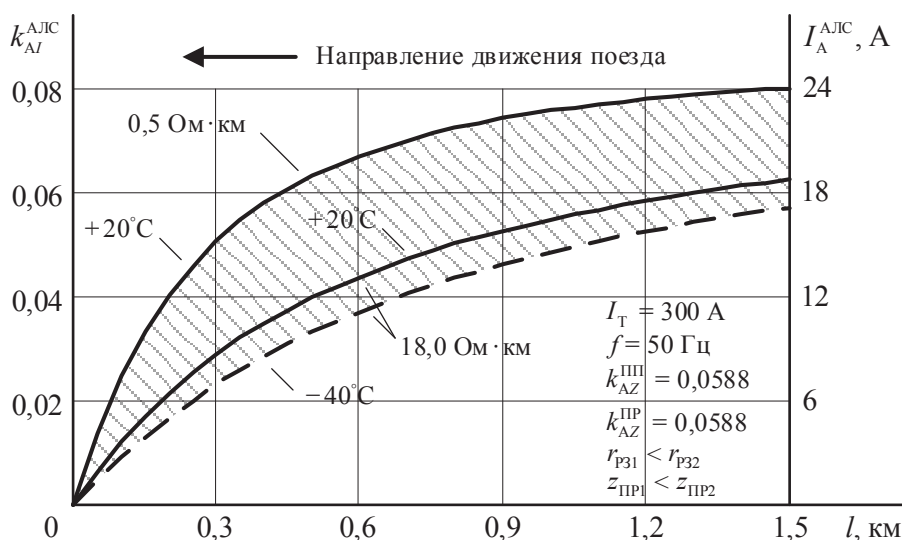


Рисунок 3.11 – Асимметрия первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по рельсовой линии с поперечной и продольной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей при подключении цепей заземления к рельсовой нити с меньшим продольным сопротивлением

Асимметрия третьей гармоники тягового тока при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле, температуре рельсов $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отсутствии подвижных единиц на РЦ уменьшается с $4,7\text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,039$) в начале РЦ до $3,7\text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,032$) в её конце. При температуре рельсов $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ асимметрия тягового тока начале РЦ составляет $4,2\text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,035$) и по длине РЦ практически не меняется.

Характер кривых изменения асимметрии первой и третьей гармоник тягового тока под катушками АЛС схожи, но их величины различаются из-за большего продольного сопротивления рельсовых нитей третьей гармонике тягового тока (рисунок 3.12). При вступлении поезда на РЦ, например, коэффициент асимметрии третьей гармоники тягового тока в $1,05$ раза больше при максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле и в $1,16$ раза меньше при минимальном.

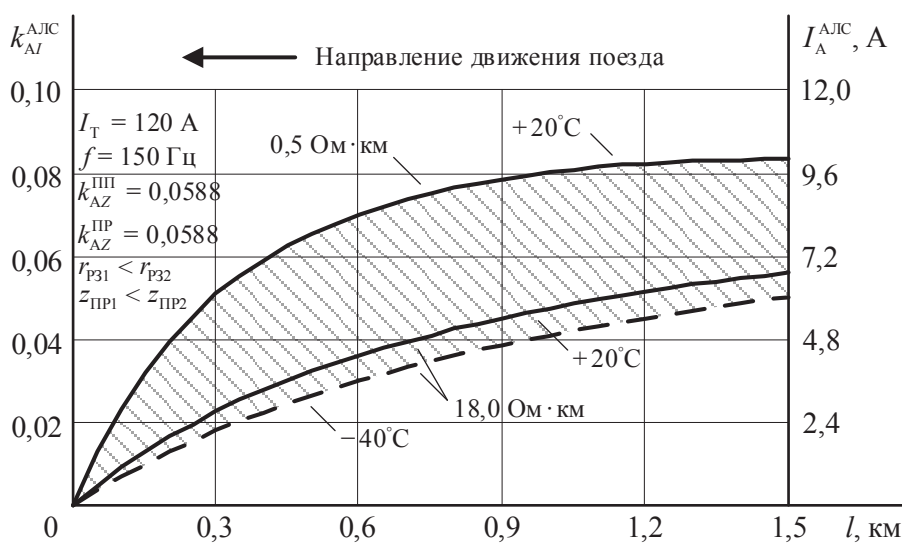


Рисунок 3.12 – Асимметрия третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по рельсовой линии с поперечной и продольной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей при подключении цепей заземления к рельсовой нити с меньшим продольным сопротивлением

В случае, когда цепи заземления оказываются подключёнными к рельсовой нити, у которой продольное сопротивление больше по сравнению с другой нитью, асимметрия сопротивлений рельсовых нитей уменьшается. Тогда при отсутствии

на РЦ подвижных единиц, температуре рельсов $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле асимметрия первой гармоники тягового тока в начале РЦ составляет 1,2 А (коэффициент асимметрии 0,004) и 9,0 А (коэффициент асимметрии 0,077) в её конце. При температуре рельсов $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ асимметрия тягового тока по длине РЦ меняется мало и равна в среднем 10,5 А (коэффициент асимметрии 0,035).

При минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле величина асимметрии первой гармоники тягового тока под катушками АЛС не превышает 4 А при тяговом токе 300 А (рисунок 3.13). При максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле поперечная асимметрия сопротивлений слабее влияет на распределение тягового тока, и величина его асимметрии определяется в основном продольной асимметрией сопротивлений. Рост температуры рельсов приводит к росту асимметрии тягового тока за счёт увеличения разности продольных сопротивлений рельсовых нитей.

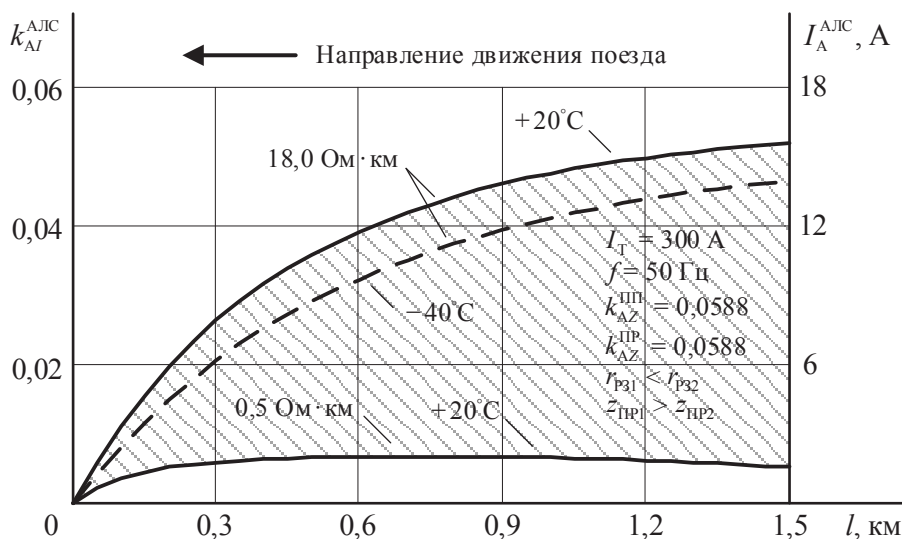


Рисунок 3.13 – Асимметрия первой гармоники тягового тока

под катушками АЛС при движении поезда по рельсовой линии с поперечной и продольной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей при подключении цепей заземления к рельсовой нити с бóльшим продольным сопротивлением

При вступлении поезда на РЦ, максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле и температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ величина асимметрии первой гармоники тягового тока в 10,3 раза больше, чем при только поперечной асимметрии сопротивлений такой же величины.

При температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ величина этой асимметрии в 1,11 раза меньше, чем при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, и в 9,3 раза больше, чем при такой же температуре и поперечной асимметрии сопротивлений такой же величины.

При минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле абсолютная величина асимметрии тягового тока первой гармоники 11,3 А, что в 1,14 раза меньше, чем при только поперечной асимметрии такой же величины.

Асимметрия третьей гармоники тягового тока при отсутствии на РЦ подвижных единиц, температуре рельсов $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле равна нулю в начале РЦ и возрастает до 2,8 А (коэффициент асимметрии 0,123) в её конце. При температуре рельсов $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ асимметрия тягового тока по длине РЦ меняется мало и равна в среднем 3,1 А (коэффициент асимметрии 0,026).

Коэффициент асимметрии третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС при максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле и вступлении поезда на РЦ в 1,13 раза меньше коэффициента асимметрии тока первой гармоники (рисунок 3.14). По мере движения поезда асимметрия третьей гармоники убывает быстрее, и на расстоянии 0,3 км от выходного конца данная величина уже меньше в 1,25 раза, чем на частоте первой гармоники.

При минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле величина коэффициента асимметрии первой и третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС при вступлении поезда на РЦ одинаковы. По мере движения поезда по РЦ величина асимметрии третьей гармоники сначала растёт, достигая максимального значения на расстоянии 0,5 км от начала РЦ. Коэффициент асимметрии третьей гармоники тягового тока в этой точке почти в три раза меньше коэффициента продольной и поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей.

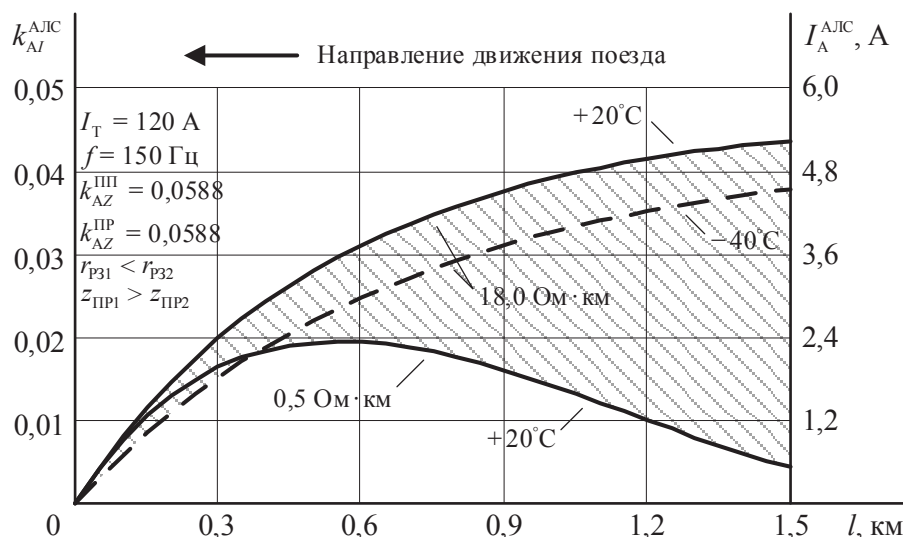


Рисунок 3.14 – Асимметрия третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по рельсовой линии с поперечной и продольной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей, при подключении цепей заземления к рельсовой нити с бóльшим продольным сопротивлением

Наиболее тяжёлые условия для работы РЦ и АЛС с точки зрения уровня помех от тягового тока в рельсах возникают при резком похолодании в осенний период, когда верхнее строение пути промерзает, а нижняя часть закопанных опор контактной сети остаётся в талом грунте [84]. Через замёрзшее верхнее строение пути утечка тягового тока из рельсов в землю минимальна, а утечка через цепи заземления остаётся прежней. В результате асимметрия тягового тока в рельсах возрастает.

Результаты исследований получены в условиях, когда температура рельсов равна $-10\text{ }^\circ\text{C}$, удельное сопротивление рельсов по отношению к земле $18,0\text{ Ом}\cdot\text{км}$, входное сопротивление каждой цепи заземления контактных опор на рельс составляет 100 Ом , т.е. удельное сопротивление изоляции заземлений равно $5\text{ Ом}\cdot\text{км}$. Этому соответствует коэффициент поперечной асимметрии сопротивлений $k_{AZ}^{ПП} = 0,6429$.

В рассматриваемых условиях при температуре $-10\text{ }^\circ\text{C}$ абсолютная величина асимметрии тягового тока по длине свободной от подвижных единиц РЦ уменьшается. При тяговом токе в рельсовой линии 300 А его асимметрия в начале РЦ равна

32,1 А (коэффициент асимметрии 0,1070), а в её конце составляет 16,6 А (коэффициент асимметрии 0,0585). Следовательно, будет фиксироваться ложная занятость РЦ.

При величине первой гармоники тягового тока 300 А абсолютное значение его асимметрии под катушками АЛС при вступлении поезда на РЦ составило 40,5 А, что в 3,1 раза больше, чем при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле (рисунок 3.15).

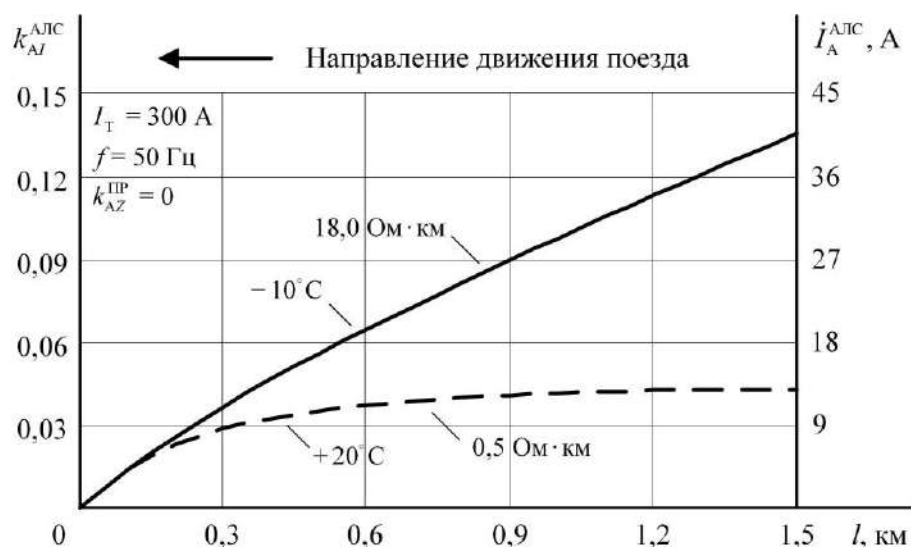


Рисунок 3.15 – Асимметрия первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по РЦ и промерзании только верхней части грунта

Если в таких условиях к поперечной асимметрии сопротивлений добавляется продольная, причём продольное сопротивление меньше у той рельсовой нити, к которой подключаются цепи заземления, то ток асимметрии под катушками АЛС может вырасти до 57 А, т.е. в 1,4 раза. В случае, если больше продольное сопротивление рельсовой нити, к которой подключаются цепи заземления, то продольная асимметрия сопротивлений компенсирует поперечную, и величина асимметрии тягового тока под катушками АЛС может снизиться до 25,8 А, т.е. в 1,6 раза по сравнению со случаем, когда продольная асимметрия отсутствует. С увеличением глубины промерзания грунта уровень помех будет снова снижаться.

Абсолютная величина асимметрии третьей гармоники тягового тока в начале РЦ равна 15,4 А (коэффициент асимметрии 0,1279), а в её конце составляет 4,4 А (коэффициент асимметрии 0,0405).

Коэффициент асимметрии третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС при вступлении поезда на РЦ в таких условиях в 1,2 раза больше, чем коэффициент асимметрии первой гармоники (рисунок 3.16). По мере движения поезда величина асимметрии тягового тока убывает практически линейно.

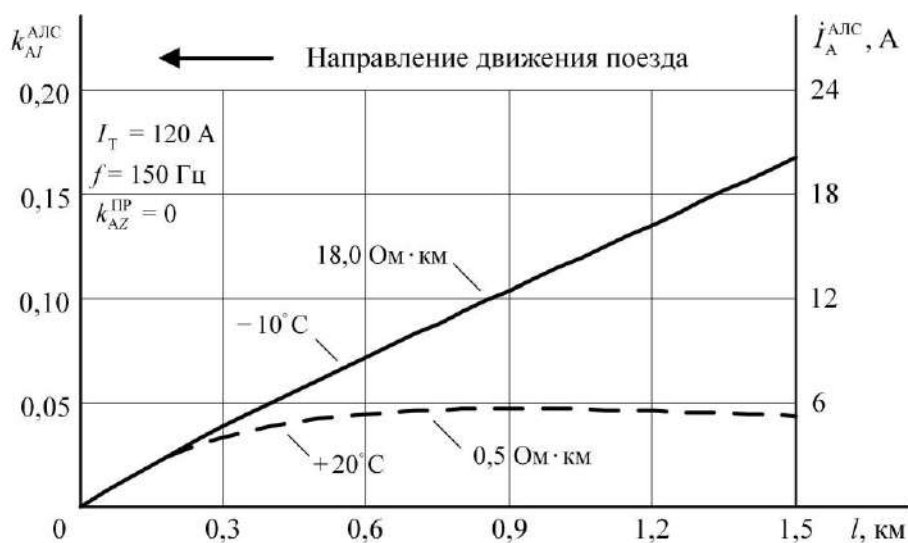


Рисунок 3.16 – Асимметрия третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по РЦ и промерзании только верхней части грунта

Таким образом, найдено, что рост частоты гармоники тягового тока может приводить как к увеличению его асимметрии, так и к уменьшению в зависимости от температуры рельсов и их сопротивления по отношению к земле.

Определено, что величина асимметрии тягового тока в рельсах в местах подключения аппаратуры РЦ и под катушками АЛС при наличии продольной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей уменьшается при снижении температуры рельсов.

Таким образом, наиболее сложными условиями для работы РЦ и АЛС является переходный процесс в осенний период при быстром промерзании верхнего строения пути.

3.6 Асимметрия тягового тока в однородной рельсовой линии на перегонах с бесстыковыми рельсовыми цепями

На перегонах, оборудованных тональными рельсовыми цепями (ТРЦ), изолирующие стыки устанавливаются только на границах перегона со станциями, а для уравнивания тягового тока в рельсовых нитях используют специально устанавливаемые дроссели типа Д-20, Д-150 или Д-300, сопротивление которых тяговому току частотой 50 Гц равно $Z_{\text{д}} = 1,0 e^{j90^\circ}$ [60].

Дроссели Д-150 и Д-300 предназначены для пропуска тягового тока 150 А и 300 А соответственно через каждую секцию обмотки, а дроссели Д-20 – для уравнивания тягового тока в бесстыковых цельносварных рельсовых плетях [79]. Тяговые токи текут по уравнивающим дросселям, если есть разность потенциалов в рельсовых нитях в точках их подключения. Но характер распределения тяговых потенциалов по длине такого перегона остаётся неясным [56].

Исследования проводились при бесстыковом пути. В этом случае существенно появление только поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей, вызываемой сопротивлениями цепей заземления опор контактной сети и других конструкций, подключённых к рельсам.

Анализ полученных в п. 3.5 результатов, показал, что при поперечной асимметрии сопротивлений температура рельсов практически не влияет на величину асимметрии тягового тока в рельсовой линии. Поэтому температура рельсов принята неизменной и равной +20 °С. Исследования распределения асимметрии первой и третьей гармоник тягового тока по длине перегона в 15 км с рельсами типа Р65, оборудованного бесстыковыми ТРЦ с средней длиной 1,5 км, проводились при коэффициенте поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей $k_{AZ}^{\text{III}} = 0,0588$ для следующих вариантов:

- без уравнивающих дросселей на стыках ТРЦ;
- при установке уравнивающих дросселей типа Д-20 на стыках ТРЦ;

– при дополнительной установке уравнивающих дросселей этого типа в середине каждой ТРЦ.

На рисунке 3.17 приведены графики изменения абсолютной и относительной величины асимметрии первой гармоники тягового тока величиной 300 А под катушками АЛС при движении поезда по перегону с бесстыковыми ТРЦ.

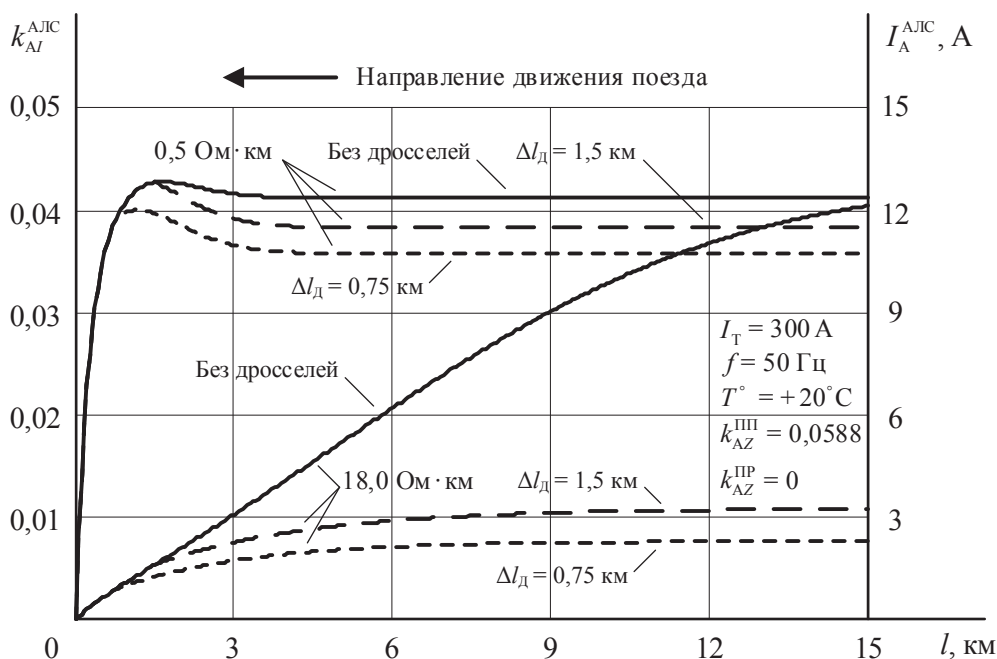


Рисунок 3.17 – Асимметрия первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по перегону с бесстыковыми ТРЦ

При движении поезда по перегону без уравнивающих дросселей при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле асимметрия тягового тока величиной 12,4 А не изменяется до тех пор, пока поезд не пройдёт точку на расстоянии 3,8 км от выходного конца перегона. Затем она растёт до максимального значения 13,1 А в точке на расстоянии 1,5 км. При дальнейшем движении поезда асимметрия тягового тока уменьшается до нуля.

С ростом сопротивления рельсов по отношению к земле утечки тягового тока из рельсов в землю через цепи заземления уменьшаются, и расстояние между максимумом величины асимметрии тягового тока и выходным концом расчётного отрезка увеличивается. Так при максимальном сопротивлении рельсов по отношению

к земле, асимметрия тягового тока под катушками АЛС по мере приближения поезда по перегону начинает убывать с 12,0 А до нуля.

Установка уравнивающих дросселей снижает величину асимметрии тягового тока в рельсах. В рельсовой линии с только поперечной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей тяговый ток больше в той рельсовой нити, к которой подключаются цепи заземления. При одинаковых продольных сопротивлениях рельсовых нитей тяговый потенциал в каждой точке этой рельсовой нити будет больше, чем потенциал другой рельсовой нити. В точках подключения уравнивающих дросселей тяговый ток будет перетекать по ним из точки с бóльшим потенциалом в точку с меньшим потенциалом, вследствие чего тяговые токи в рельсовых нитях в определённой степени уравниваются. При движении поезда от последнего по его ходу уравнивающего дросселя эффект от их установки исчезает.

При минимальном удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле применение уравнивающих дросселей, установленных на стыках ТРЦ, позволяет в рассматриваемых условиях уменьшить величину асимметрии тягового тока под катушками АЛС на 0,9 А, т.е. в 1,1 раза. При дополнительной установке уравнивающих дросселей посередине каждой ТРЦ асимметрия тягового тока под катушками АЛС снижается на 1,8 А, т.е. в 1,2 раза.

С ростом сопротивления рельсов по отношению к земле утечка тока из рельсов в землю уменьшается, и степень уравнивания тягового тока дросселями растёт. При максимальном этом сопротивлении и установке уравнивающих дросселей на стыках ТРЦ, асимметрия тягового тока под катушками АЛС не превышает значения 3,2 А, а дополнительная установка таких дросселей посередине каждой РЦ обеспечивает её уменьшение до значения 2,5 А. Таким образом, когда поезд находится в начале перегона, значение асимметрии тягового тока под катушками АЛС уменьшается в 3,8 раза при установке дросселей через 1,5 км и в 4,8 раза, при их установке в два раза чаще.

Для количественной оценки уменьшения величины асимметрии тягового тока в рельсовых нитях от применения уравнивающих дросселей можно использовать критерий δk_d , определяемый по формуле:

$$\delta k_{\text{д}} = \frac{k_{\text{AI}}^{\text{АЛС}} - k_{\text{АД}}^{\text{АЛС}}}{k_{\text{AI}}^{\text{АЛС}}}, \quad (3.1)$$

где $k_{\text{AI}}^{\text{АЛС}}$ – значение коэффициента асимметрии тягового тока в рельсах под катушками АЛС в рассматриваемой точке при отсутствии уравнивающих дросселей;

$k_{\text{АД}}^{\text{АЛС}}$ – значение этого коэффициента при установке уравнивающих дросселей.

Значение критерия $\delta k_{\text{д}}$ равно нулю, если их установка не приводит к изменению асимметрии тягового тока под катушками АЛС. Чем сильнее уменьшается эта асимметрия после установки уравнивающих дросселей, тем больше значение этого критерия.

На рисунке 3.18 показана зависимость величины критерия $\delta k_{\text{д}}$ для первой гармоники тягового тока от среднего расстояния между уравнивающими дросселями $\Delta l_{\text{д}}$ при различных значениях удельного сопротивления рельсов по отношению к земле. Графики получены для тех же исходных данных, что и на рисунке 3.17, при условии, что поезд находился на расстоянии 15 км от выходного ДТ.

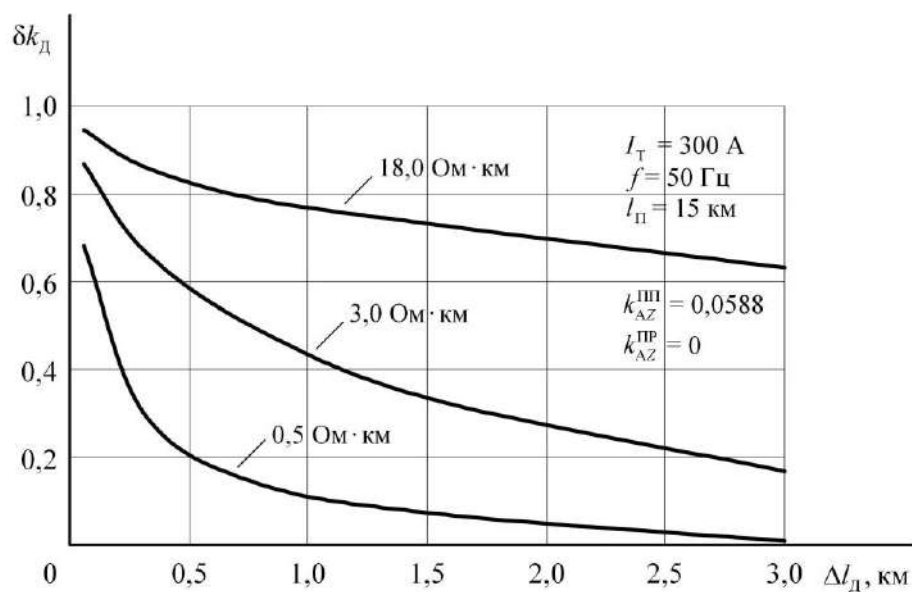


Рисунок 3.18 – Зависимость величины критерия $\delta k_{\text{д}}$ от расстояния между уравнивающими дросселями для первой гармоники тягового тока

Видно, что при увеличении расстояния между уравнивающими дросселями и/или при снижении сопротивления рельсов по отношению к земле степень уравнивания тягового тока уменьшается. При уменьшении среднего расстояния между уравнивающими дросселями с 3,0 км до 1,0 км значение критерия δk_d возрастает практически линейно.

Так, при удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле, равном 18 Ом·км и изменении расстояния между уравнивающими дросселями в данном диапазоне значение критерия δk_d растёт с 0,63 до 0,76. С дальнейшим уменьшением расстояния между дросселями степень роста этого критерия увеличивается.

При снижении сопротивления рельсов по отношению к земле утечка тягового тока из рельсов в землю возрастает, в результате чего уменьшаются величина тягового тока в рельсах и степень его уравнивания. При удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле 3,0 Ом·км и расстоянии между уравнивающими дросселями 3,0 км значение критерия δk_d составляет 0,17, а при уменьшении данного расстояния до 1,0 км значение этого критерия увеличивается до 0,43.

При удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле 0,5 Ом·км степень уравнивания тягового тока невелика и при среднем расстоянии между уравнивающими дросселями больше 1,0 км величина критерия δk_d не превышает 0,10.

На рисунке 3.19 представлен график зависимости коэффициента асимметрии первой гармоники тягового тока под катушками АЛС от удельного сопротивления рельсов по отношению к земле при среднем расстоянии между уравнивающими дросселями 0,75 км и 1,5 км, а также при отсутствии таких дросселей. В последнем случае величина коэффициента асимметрии тягового тока под катушками АЛС принималась неизменной.

Кривые изменения асимметрии тягового тока третьей гармоники имеют максимумы, расположенные ближе к выходному концу рельсовой линии, чем для первой гармоники (рисунок 3.20). При минимальном удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле максимальное значение коэффициента асимметрии третьей

гармоники тягового тока в 1,08 раза больше, чем максимальное значение коэффициента асимметрии первой гармоники и находится на расстоянии 1,0 км от выходного ДТ.

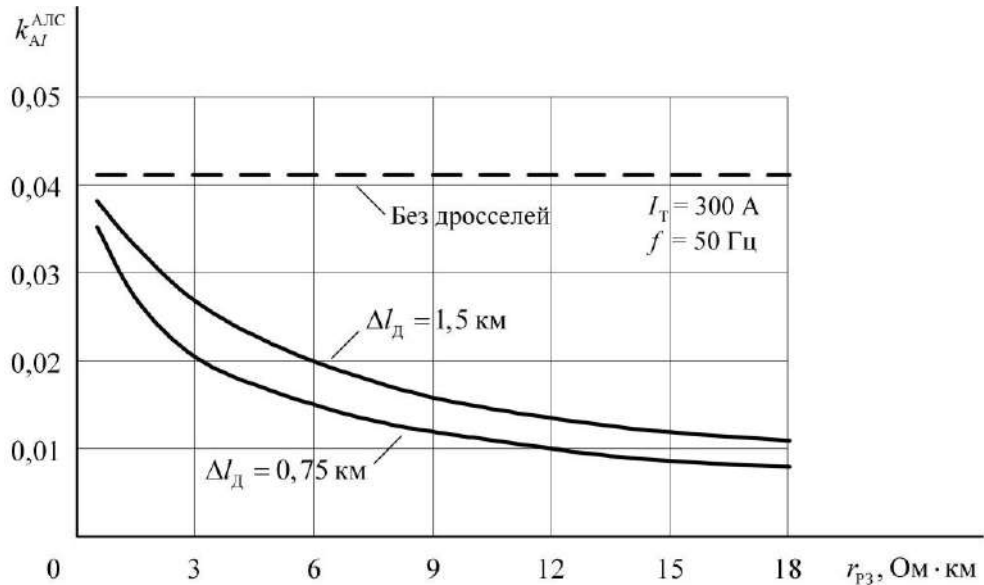


Рисунок 3.19 – Зависимость асимметрии первой гармоники тягового тока под катушками АЛС от удельного сопротивления рельсов по отношению к земле

При максимальном удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле максимальное значение коэффициента асимметрии третьей гармоники тягового тока в 1,10 раза больше, чем максимальное значение коэффициента асимметрии первой гармоники и находится на расстоянии 12,0 км от выходного ДТ.

Степень уравнивания третьей гармоники тягового тока дросселями ниже, чем первой, т.к. сопротивление таких дросселей растёт прямо пропорционально номеру гармоники и становится в три раза больше. При минимальном удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле применение уравнивающих дросселей, установленных на стыках РЦ, позволяет уменьшить величину асимметрии тягового тока под катушками АЛС на 0,17 А, т.е. в 1,04 раза. При дополнительной установке уравнивающих дросселей в середине каждой РЦ, асимметрия тягового тока под катушками АЛС снижается на 0,33 А, т.е. в 1,09 раза.

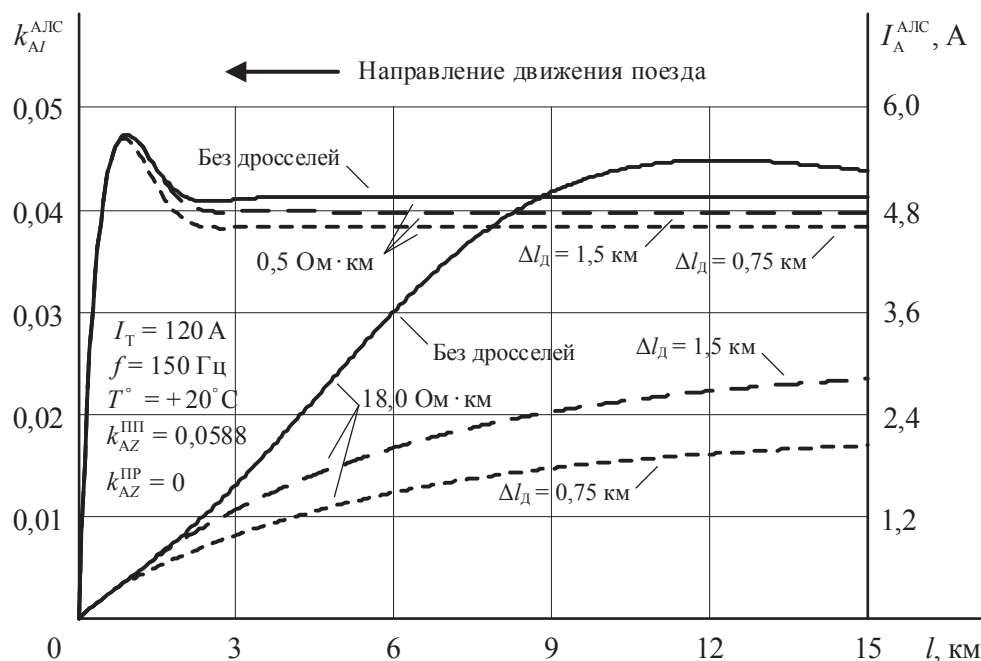


Рисунок 3.20 – Асимметрия третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по перегону с бесстыковыми ТРЦ

С ростом сопротивления рельсов по отношению к земле утечка тягового тока из рельсов в землю уменьшается, и степень его уравнивания дросселями растёт. При максимальном удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле и установке уравнивающих дросселей на стыках РЦ, значение асимметрии третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС не превышает значения 2,4 А, а при дополнительной установке таких дросселей в середине каждой РЦ эта величина уменьшается до значения 1,7 А. Таким образом, когда поезд находится на расстоянии 15 км от выходного конца, асимметрия третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС уменьшается в 1,80 раза при установке дросселей через 1,5 км и в 2,53 раза, если дроссели установлены в два раза чаще.

На рисунке 3.21 показана зависимость величины критерия δk_d для третьей гармоники тягового тока от среднего расстояния между уравнивающими дросселями Δl_d при различных значениях удельного сопротивления рельсов по отношению к земле, когда поезд вступает на перегон длиной 15 км.

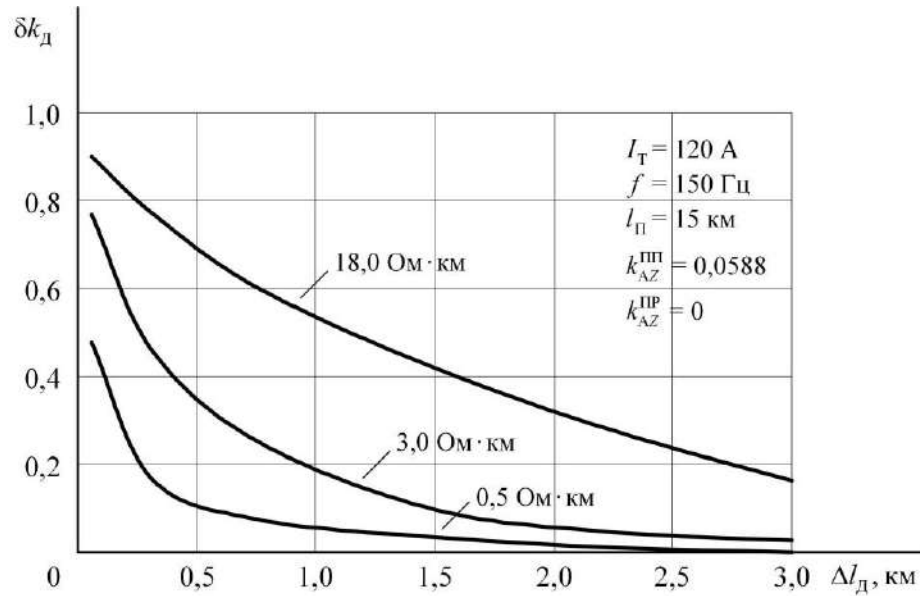


Рисунок 3.21 – Зависимость величины критерия δk_d от расстояния между уравнивающими дросселями для третьей гармоники тягового тока

Видно, что с ростом гармоники тягового тока степень его уравнивания дросселями уменьшается. Значение критерия δk_d не превышает 0,10 при удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле 0,5 Ом·км, если среднее расстояние между уравнивающими дросселями больше 0,5 км.

При удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле 3,0 Ом·км значение критерия δk_d составляет 0,35, если расстояние между дросселями равно 0,5 км. Если данное расстояние увеличить до 1,5 км, то значение данного критерия для уравнивания третьей гармоники тягового тока снижается до 0,10.

При максимальном удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле 18,0 Ом·км и при уменьшении среднего расстояния между уравнивающими дросселями с 3,0 км до 0,75 км значение критерия δk_d возрастает практически линейно с 0,17 до 0,60.

На рисунке 3.22 показана зависимость коэффициента асимметрии третьей гармоники тягового тока от удельного сопротивления рельсов по отношению к земле без уравнивающих дросселей и при их установке.

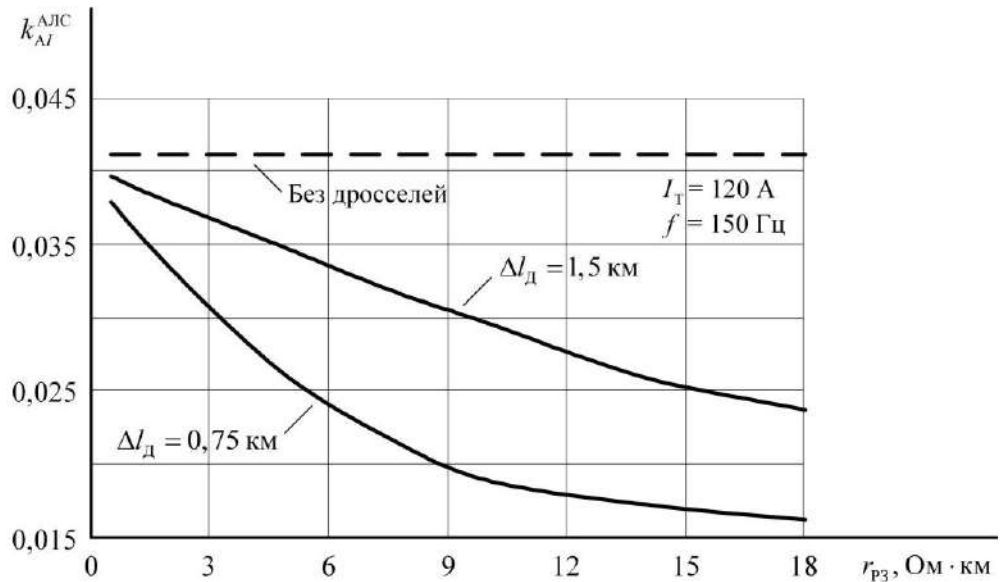


Рисунок 3.22 – Зависимость асимметрии третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС от удельного сопротивления рельсов по отношению к земле

Расчёты асимметрии тягового тока для перегона Паприха – Туфаново Северной железной дороги, предоставленного научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС») приведены в Приложении Ж.

Таким образом, исследовано изменение асимметрии первой и третьей гармоник тягового тока под приёмными локомотивными катушками АЛС при движении поезда по перегону, оборудованному бесстыковыми ТРЦ с уравнивающими дросселями и без них. Установлено, что при применении уравнивающих дросселей асимметрия гармоник тягового тока тем сильнее снижается, чем выше сопротивление рельсов по отношению к земле. Уменьшение сопротивления рельсов по отношению к земле и/или рост частоты гармоники тягового тока приводит к снижению степени его уравнивания дросселями.

3.7 Асимметрия тягового тока в неоднородной рельсовой линии

Продольные и поперечные сопротивления рельсовых нитей чаще неодинаковы по их длине, чем и определяется неоднородность рельсовой линии. Поэтому

интересны исследования изменения величины асимметрии первой и третьей гармоник тягового тока при выходе из поля допуска величин электрических сопротивлений токопроводящих или изолирующих элементов рельсовых нитей.

В качестве примера приведены результаты исследований этих изменений в РЦ, оборудованной ДТ, при рельсах типа Р65 и температуре +20 °С, когда на первом по ходу поезда отрезке рельсовой линии длиной 1,0 км удельные продольные сопротивления рельсовых нитей одинаковы и равны $0,8e^{j65^\circ}$ Ом/км, а коэффициент поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей равен 0,0943.

На оставшемся отрезке РЦ длиной 0,5 км удельное продольное сопротивление у рельсовой нити с меньшим поперечным сопротивлением равно $0,48e^{j65^\circ}$ Ом/км, а у другой рельсовой нити $0,40e^{j65^\circ}$ Ом/км. Коэффициент поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей на этом отрезке равен 0,0588. Удельные сопротивления рельсов по отношению к земле брались равным 0,5, 1,5 и 18,0 Ом·км.

При удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле 0,5 Ом·км абсолютная величина асимметрии тягового тока в начале РЦ была равна 13,2 А (коэффициент асимметрии 0,044), а в её конце составляла 6,8 А (коэффициент асимметрии 0,061).

Если удельное сопротивление рельсов по отношению к земле равно 1,5 Ом·км, то абсолютная величина асимметрии тягового тока в начале РЦ равна 9,2 А (коэффициент асимметрии 0,0306), а в её конце составляет 3,9 А (коэффициент асимметрии 0,0182). В обоих случаях величина тягового тока в начале РЦ была больше в рельсовой нити, к которой подключены цепи заземления опор контактной сети, а в конце ток становился больше в другой рельсовой нити.

При температуре –40 °С и удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле 18,0 Ом·км тяговый ток по всей длине РЦ меньше в рельсовой нити, к которой подключены цепи заземления опор контактной сети. Абсолютная величина асимметрии тягового тока в начале РЦ равна 5,0 А (коэффициент асимметрии 0,0165), а к её концу растёт до 6,1 А (коэффициент асимметрии 0,0210).

Изменения асимметрии первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по рассматриваемой неоднородной рельсовой линии показаны на рисунке 3.23. За плюсовую асимметрию тягового тока приняты случаи, когда тяговый ток превагирует в рельсовой нити, к которой подключены цепи заземления опор контактной сети. Если тяговый ток оказывается больше в другой рельсовой нити, асимметрия считается отрицательной.

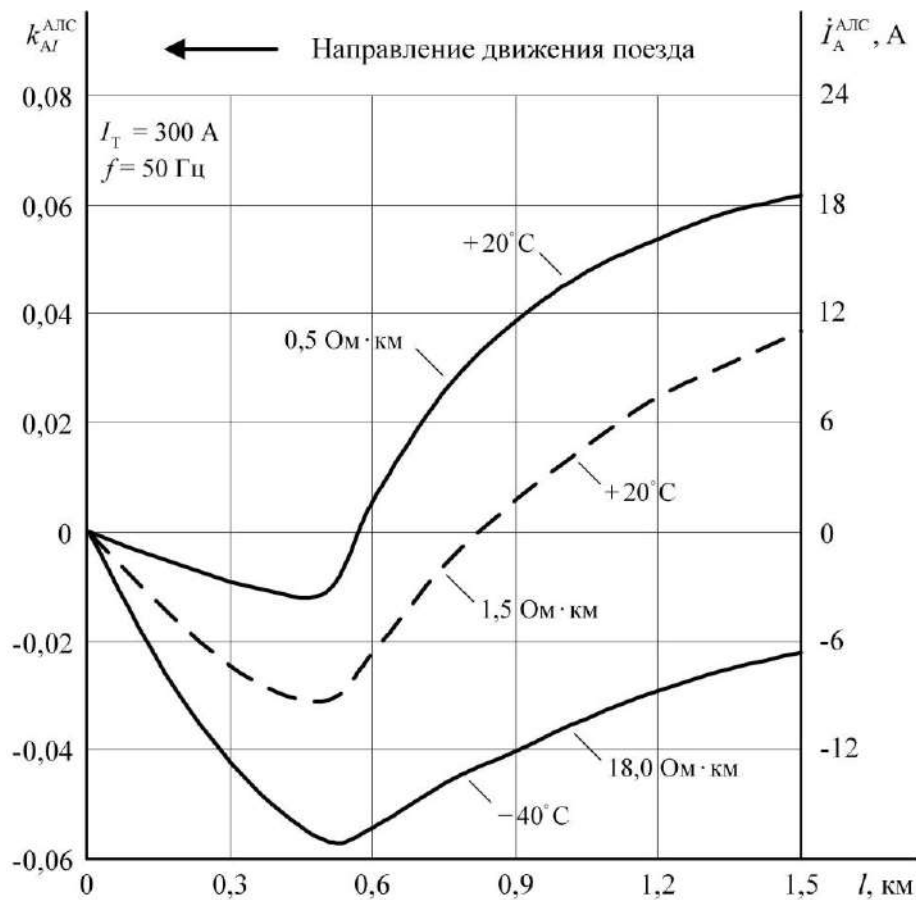


Рисунок 3.23 – Изменение асимметрии первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по неоднородной рельсовой линии

На первом участке РЦ, где нет продольной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей, с увеличением сопротивления рельсов по отношению к земле асимметрия тягового тока, как и на рисунке 3.7, уменьшается (рисунок 3.23).

После пересечения электровозом точки, где его тяговый ток становится меньше в рельсовой нити, к которой подключены цепи заземления опор контактной

сети на рельс, из-за действия продольной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей, асимметрия тягового тока под приёмными локомотивными катушками АЛС начинает расти с увеличением сопротивления рельсовых нитей по отношению к земле. Последнее увеличение вызывает также смещение точки с нулевой асимметрией тягового тока к началу РЦ.

При минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле и при вступлении поезда на РЦ тяговый ток больше в рельсовой нити, к которой подключены цепи заземления опор контактной сети, а абсолютная величина его асимметрии при тяговом токе 300 А равна 18,6 А. По мере движения поезда величина асимметрии тягового тока под катушками АЛС плавно уменьшается.

На расстоянии 0,58 км от выходного конца РЦ асимметрия тягового тока уменьшается до нуля. Затем величина тягового тока под катушками АЛС становится больше в другой рельсовой нити, а ток асимметрии начинает расти до момента пока поезд не пройдёт точку на расстоянии 0,5 км от выходного конца РЦ. В данной точке абсолютная величина асимметрии тягового тока составляет 3,3 А.

При дальнейшем движении поезда величина асимметрии тягового тока падает вследствие выравнивающего действия сопротивлений секций основных обмоток ДТ.

При максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле утечка тягового тока из рельсовых нитей в землю невелика, отчего тяговый ток под катушками АЛС по всей длине рельсовой линии больше в рельсовой нити с меньшим продольным сопротивлением. При вступлении поезда на РЦ ток асимметрии составляет 6,7 А, что в 2,8 раза меньше, чем при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле.

При движении поезда длины отрезков рельсовых нитей до выходного конца РЦ укорачиваются, и влияние сопротивлений участка с продольной асимметрией на входные сопротивления растёт, отчего при дальнейшем движении поезда асимметрия тягового тока под катушками АЛС плавно увеличивается, достигая максимального значения, равного 16,7 А. Эта величина примерно в пять раз больше, чем при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле.

При удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле $0,5 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ и при таком же распределении продольных и поперечных сопротивлений рельсовых нитей абсолютная величина асимметрии третьей гармоники тягового тока в начале РЦ была равна $3,5 \text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,029$), а в её конце составляла $2,8 \text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,110$). При этом величина тягового тока по всей длине РЦ больше в рельсовой нити, к которой подключены цепи заземления опор контактной сети. При температуре $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ и удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле $18,0 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ тяговый ток по всей длине РЦ в этой же рельсовой нити меньше. Абсолютная величина асимметрии третьей гармоники тягового тока в начале РЦ равна $1,3 \text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,011$), а к её концу растёт до $2,0 \text{ А}$ (коэффициент асимметрии $0,017$).

На рисунке 3.24 приведен график изменения асимметрии третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по рассматриваемой РЦ. Третья гармоника тягового тока интенсивнее стекает из рельсов в землю. Поэтому характер изменения асимметрии третьей гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по этой же неоднородной рельсовой линии, приведённый на рисунке 3.23, несколько отличается от подобных графиков для асимметрии первой гармоники тягового тока. Величина коэффициента асимметрии этой гармоники тягового тока мало отличается от такого коэффициента для первой гармоники тягового тока, хотя он и несколько выше. Точка с нулевой асимметрией тягового тока сдвигается к началу РЦ. Исследования проводились при величине третьей гармоники тягового тока, равной 120 А , поэтому абсолютные значения асимметрии этой гармоники тягового тока меньше, чем для токов первой гармоники.

Исследования для более высоких частот гармоник тягового тока не проводились, поскольку асимметрия этих токов особого интереса с точки зрения их мешающего влияния на работу РЦ и АЛС не представляет.

Таким образом, при движении поезда по такой неоднородной рельсовой линии, ограниченной изолирующими стыками с ДТ, можно ожидать сбоев АЛС в начале движения по ней поезда в летний период, а в зимний период – в конце РЦ.

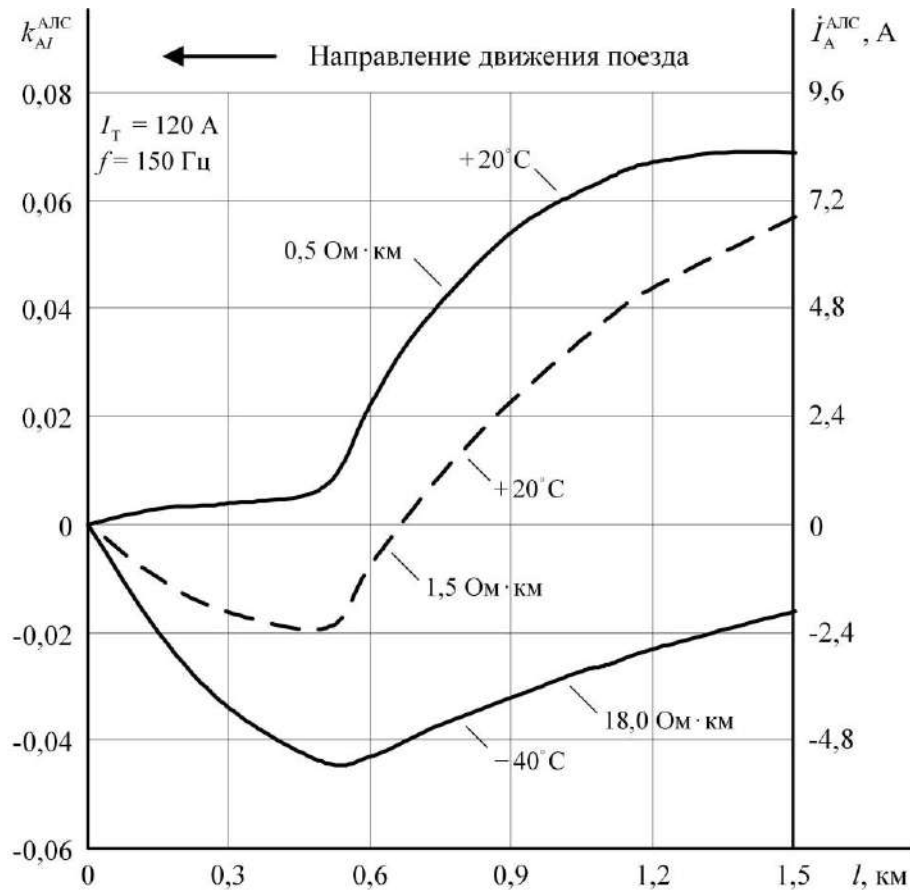


Рисунок 3.24 – Изменение асимметрии третьей гармонике тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по неоднородной рельсовой линии

Вариантов распределения продольных и поперечных сопротивлений рельсовых нитей по длине рельсовой линии существует много [29]. Это затрудняет оценку электромагнитной обстановки на конкретном участке пути [13].

3.8. Верификация методики расчёта помех на приёмники сигналов от тягового тока

Истинность (правильность) разработанной методики расчёта помех от тягового тока в неоднородной рельсовой линии на аппаратуру РЦ и АЛС проверена следующим образом. Выполнено сравнение результатов, полученных с использованием этой методики, с результатами измерения уровней переменных тяговых то-

ков в рельсовых линиях и помех от них в условиях эксплуатации на участках Транс-Сибя, электрифицированных на переменном токе, а также сравнение с результатами расчётов по другим методикам.

Разработанная методика расчётов позволяет находить, как растёт переменный тяговый ток в рельсах при приближении головы поезда к какой-то точке рельсовой линии (рисунок 3.5). Для определения достоверности таких расчётов были использованы результаты измерений величины переменного тягового тока в рельсовой линии, выполненных в июле 2002 года сотрудниками Иркутского института инженеров железнодорожного транспорта, по мере приближения поезда с запада к границе станции Подкаменная Восточно-Сибирской железной дороги (рисунок 3.25).

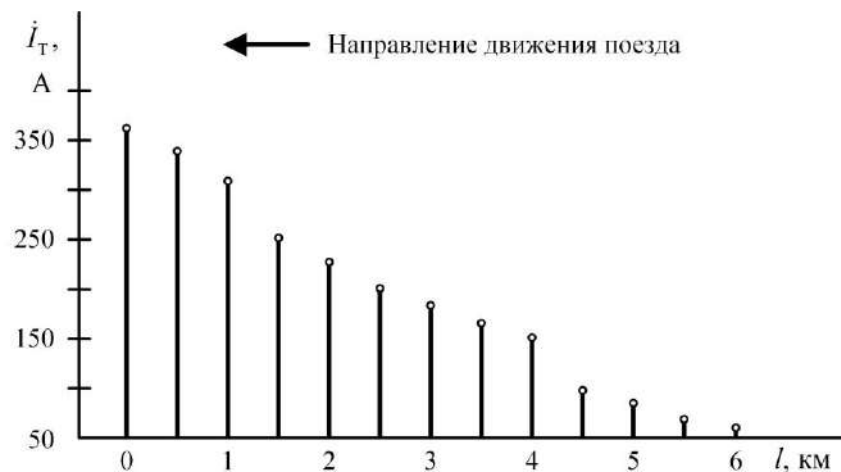


Рисунок 3.25 – Изменение величины переменного тягового тока при приближении поезда

Сравнение результатов этих измерений с результатами расчётов по разработанной методике, показанных на рисунке 3.5, подтверждают достоверность данных, получаемых при использовании этой методики.

Корректность разработанной методики проверена анализом разных результатов определения изменения коэффициента асимметрии переменного тягового тока под приёмными локомотивными катушками АЛС при движении поезда по однородной рельсовой линии. На рисунке 3.26 представлены графики изменения этого

коэффициента. Кривая 1 получена решением дифференциальных уравнений распределения тока и напряжения по длине однородной линии [48], кривая 2 – вычислением входных сопротивлений рельсовых нитей [76], кривая 3 – с использованием разработанной методики [77]. Для корректного сравнения результатов, полученных различными способами, влияние взаимной индуктивности смежных рельсовых линий с контактными проводами и линиями продольного электроснабжения не учитывалось.

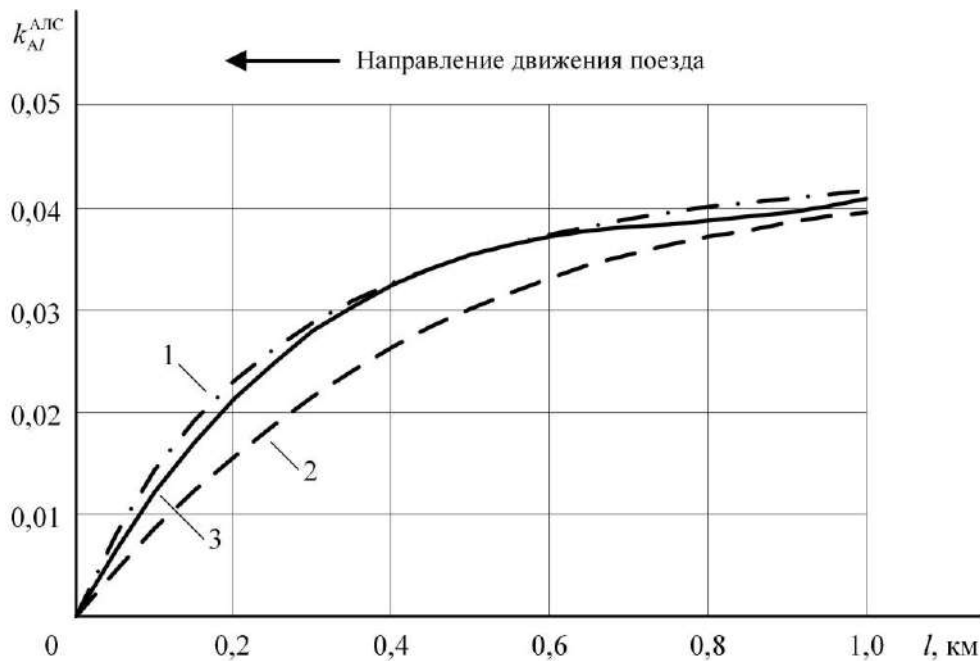


Рисунок 3.26 – Изменения коэффициента асимметрии тягового тока по длине однородной рельсовой линии

Рассматривалась рельсовая линия длиной 1,0 км, оборудованная РЦ с рельсами типа Р65 и дроссель-трансформаторами типа ДТ-1-300, при температуре рельсов $+20^{\circ}\text{C}$, удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле $0,5 \text{ Ом}\cdot\text{км}$, удельном сопротивлении изоляции цепей заземления опор контактной сети $4,0 \text{ Ом}\cdot\text{км}$.

Учёт в разработанной методике сопротивления воздушной отсасывающей линии тяговой подстанции и влияния взаимной индуктивности рельсовых нитей по

длине рельсовой линии вызвал некоторое увеличение степени изменения асимметрии тягового тока под катушками АЛС при движении поезда (кривая 3). В целом отличия графиков изменения рассматриваемого коэффициента асимметрии по длине рельсовой линии, найденные этими тремя способами, определяются разностью точности расчётов.

Проверена также достоверность получаемых по разработанной методике результатов того, как изменяется асимметрия обратного тягового тока при движении поезда по несимметричной рельсовой линии. Для сравнения взяты результаты измерения величины асимметрии переменного тягового тока под катушками АЛС из кабины электровоза с использованием цифрового запоминающего осциллографа при движении поезда по перегону Хабзас – Нанхчул Красноярской железной дороги (рисунок 3.27). Измерения проводились в июле 2008 года при удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле 2,0 Ом/км и активном проявлении и поперечной, и продольной асимметрии сопротивления рельсовых линий.

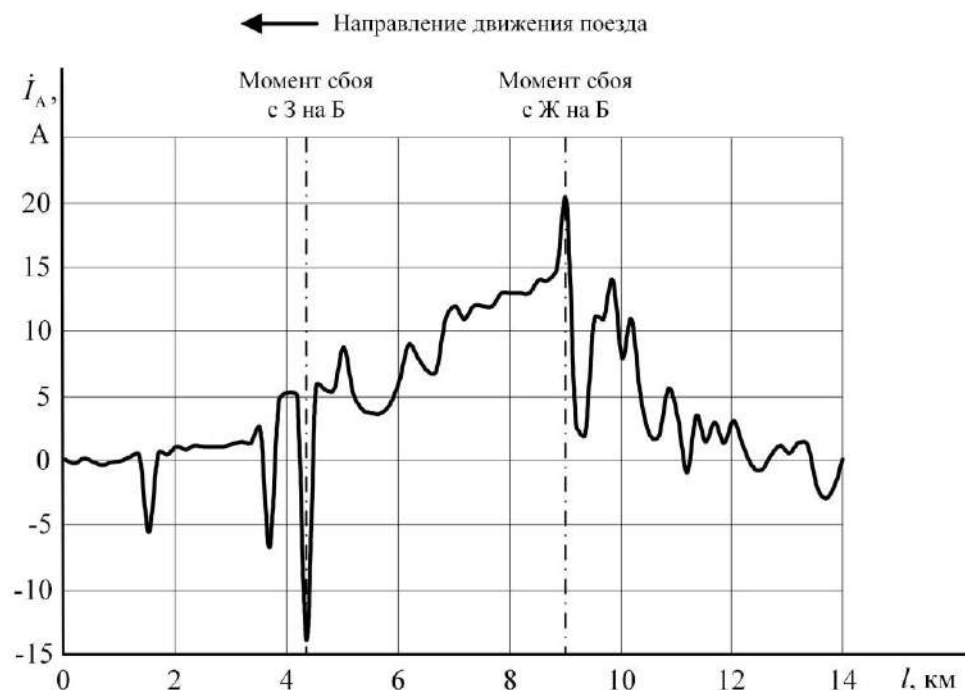


Рисунок 3.27 – Изменение асимметрии тягового тока под приёмными локомотивными катушками при движении поезда

Из результатов измерений видно, что на большей части перегона тяговый ток интенсивно стекал через цепи заземления, и, если утечка превышала 20 А, происходил сбой в работе АЛСН. Но на этом участке были и отрезки рельсовой линии с плохим состоянием токопроводящих соединений рельсовых звеньев. Рост величины продольной асимметрии сопротивления рельсовой линии при приближении поезда к станции Хабзас привёл ко второму сбою в работе АЛСН.

Сравнение результатов этих измерений в условиях эксплуатации с результатами расчётов по разработанной методике, показанных на рисунке 3.23, показывает хорошую сходимость результатов расчётов с реальными данными.

Таким образом, получаемые с использованием разработанной методики результаты удовлетворительно согласовываются с результатами соответствующих измерений в условиях эксплуатации и с результатами расчётов других авторов, что подтверждает правильность этой методики для использования при расчётах уровня помех от переменного тягового тока на работу приёмников сигналов РЦ и АЛС.

3.9 Способы уменьшения влияния асимметрии тягового тока в рельсовых линиях на работу рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации

Уменьшить степень мешающего влияния асимметрии тягового тока в рельсовых линиях можно повышением помехозащищённости и/или уменьшением уровня создаваемых помех. Последнее можно обеспечить повышением качества содержания верхнего строения пути.

Уровень помех от тягового тока, вызванных продольной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей при звеньевом пути, можно уменьшить поддержанием стыков и стыковых соединителей в исправном состоянии. Однако величина тягового тока в рельсовой линии почти прямо пропорциональна уровню помех от него, поэтому на участках железных дорог с высокоскоростным и тяжеловесным движением перспективным решением данной проблемы является переход на плетевой

путь. Уменьшить уровень помех от тягового тока, вызванных поперечной асимметрией сопротивлений, можно только отказавшись от заземления различных конструкций на рельсы.

Улучшить помехозащищенность аппаратуры РЦ и АЛС можно путём увеличения коэффициента возврата релейных элементов в их приёмниках [2] и/или повышением качества фильтрации помех [111].

Сигнальные токи в РЦ и АЛС имеют несущие частоты в нижней части звукового диапазона. Поэтому в аппаратуре РЦ и АЛС используются электрические фильтры на резонансных LC -контурах, построенных на конденсаторах и катушках индуктивности с сердечниками. Увеличение количества LC -контуров в фильтрах повышает степень ослабления ими помех, но отрицательно сказывается на стоимости приёмников.

Ослабление сигналов помех удобно оценивать величиной коэффициента ослабления сигналов, равной обратному значению коэффициента передачи.

Степень фильтрации помех определяется качеством регулировки фильтров и электромагнитной обстановкой. Сложность их регулировки в контрольно-ремонтных пунктах определяет то, что после регулировки ни один из испытанных фильтров типа ФЛ-25/75М не обеспечивал требуемое ослабление сигнала в 100 раз. Изменение значения сигнального тока и тока асимметрии под катушками АЛС при движении поезда может приводить к изменению индуктивного сопротивления катушек индуктивности и, следовательно, к смещению резонансной частоты, что отрицательно сказывается на степени ослабления помех.

Это определяет необходимость разработки новых способов, обеспечивающих ослабление сигналов помех от гармоник переменного тягового тока и устройств для их технической реализации.

Средняя мощность помех от тягового тока в приёмнике равна сумме средних мощностей каждой гармоники и не зависит от фаз отдельных гармоник [15]. Это использовано при разработке способа ослабления таких помех за счёт их компенсации. Сущность разработанного способа заключается в следующем (рисунок 3.28). Сигнал, поступающий на вход устройства, предназначенного для ослабления

помех, содержит полезный сигнал $\dot{U}(\omega_c)$ на несущей частоте ω_c и сумму сигналов помех $\sum \dot{U}(\omega_i)$ на частотах ω_i . Этот сигнал можно представить суммой $\dot{U}(\omega_c) + \sum \dot{U}(\omega_i)$. Если из входного сигнала вырезать его полезную составляющую $\dot{U}(\omega_c)$, то на выходе этого канала останется сумма сигналов помех $\sum \dot{U}(\omega_i)$. Если затем выполнить несложную процедуру вычитания $[\dot{U}(\omega_c) + \sum \dot{U}(\omega_i)] - \dot{U}(\omega_c)$, то в результате на выходе устройства получим полезный сигнал $\dot{U}(\omega_c)$, очищенный от помех.

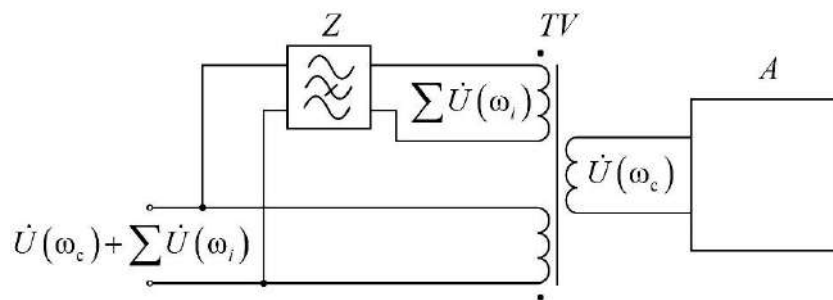


Рисунок 3.28 – Схема компенсатора помех в гармоническом низкочастотном сигнале

При технической реализации этого способа вырезать полезную составляющую из входного сигнала можно режекторным фильтром, а операцию вычитания сигналов помех, частоты которых находятся в нижней части звукового диапазона, удобно выполнять с использованием трансформаторов.

Для этого можно применить два одинаковых трансформатора или трансформатор с двумя одинаковыми включёнными встречно входными катушками [66]. На одну входную катушку такого трансформатора подаётся сигнал, например, с локомотивных катушек. На вторую входную катушку трансформатора подаётся сигнал прямо с выхода режекторного фильтра. Выходной сигнал снимается с выходной катушки трансформатора (рисунок 3.28).

Опытный образец такого компенсатора гармонических помех был испытан в лабораторных условиях. Испытания проводились отдельно для каждого канала,

рассчитанного на определённую несущую частоту сигнального тока (Приложение 3). Результаты эксперимента для сигнала с несущей частотой 25 Гц сведены в таблицу 3.1, в которой для сравнения приведены данные для серийного локомотивного фильтра типа ФЛ 25/75М [80].

Таблица 3.1 – Ослабление гармонических сигналов
фильтром ФЛ-25/75М и компенсатором

Частота, Гц	Коэффициент ослабления сигнала			Ослабление сигнала, дБ		
	фильтр ФЛ-25/75М		компенсатор	фильтр ФЛ-25/75М		компенсатор
	по ТУ	фактически	фактически	по ТУ	фактически	фактически
25	2,2 – 2,5	4,1	2,4	6,8 – 8,0	12,3	7,6
50	≥ 1000	50,0	119,2	≥ 60	34,0	41,5
100	≥ 40	32,3	53,8	≥ 32	30,2	34,6
150	≥ 500	83,3	46,2	≥ 54	38,4	33,3

Лабораторные испытания подтвердили корректность разработанного способа. Опытный образец компенсатора ослаблял основную помеху на частоте 50 Гц в два раза больше, чем локомотивный фильтр, но несколько меньше ослаблял помеху на частоте 150 Гц. Следует иметь в виду, что помеха на частоте 50 Гц является наиболее значимой с точки зрения помехоустойчивости системы АЛСН, т.к. с повышением частоты сигнала помехи её напряжение уменьшается.

Эксперимент показал также, что степень ослабления помех компенсатором ограничена в определённой мере при использовании простейшего режекторного фильтра в виде резонансного контура, включающего в себя параллельно соединённые конденсатор и катушку индуктивности с невысокой добротностью. Повысить качество работы такого компенсатора можно применением более совершенных режекторных фильтров с максимальной крутизной характеристики затухания или дополнительным селективным усилением компенсирующего сигнала.

При технической реализации данного способа компенсации помех конструктивно компенсатор помех существенно проще конструкции серийного локомотивного фильтра, а использование операции вычитания обеспечивает независимость степени ослабления сигналов при изменении насыщения сердечников в компенсаторе.

3.10 Выводы по главе

1. Количественно определён характер растекания величин основных гармоник тягового тока по длине рельсовых нитей при разных значениях их продольных и поперечных сопротивлений.

2. Найдены количественные зависимости распределения гармоник переменного тягового тока с частотами 50 Гц и 150 Гц по однородной рельсовой линии, оборудованной различными типами РЦ, для разных значений продольной и поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей с учетом температуры окружающей среды и величины тягового тока в рельсах.

3. Найдены количественные зависимости изменения асимметрии гармоник тягового тока на релейном конце смежной РЦ и степени их влияния на их работу при приближении к нему поезда по предыдущей РЦ, когда РЦ ограничены изолирующими стыками с дроссель-трансформаторами.

4. Установлено, что увеличение частоты гармоники тягового тока может приводить как к росту асимметрии тягового тока под приёмными локомотивными катушками АЛС при движении поезда по однородной рельсовой линии, оборудованной кодовой РЦ с ДТ, так и к её снижению в зависимости от соотношения продольной и поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей.

5. Установлено, что величина асимметрии переменного тягового тока под катушками АЛС при наличии только продольной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей увеличивается за счёт действия взаимной индуктивности рельсовых нитей в рельсовой линии в среднем на треть.

6. Определено, что влияние взаимной индуктивности рельсовых нитей при наличии только продольной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в рельсовой линии увеличивает асимметрию переменного тягового тока под катушками АЛС в среднем на четверть.

7. Найдено, что наиболее сложными условиями для работы РЦ и АЛС, с точки зрения помех, является переходный процесс в осенний период при быстром промерзании верхнего строения пути, когда при малых утечках тягового тока из рельсов в землю через грунт он продолжает активно стекать через цепи заземления, подключенные к рельсам.

8. Предложен критерий, позволяющий сравнить величины асимметрии гармоник тягового тока в рельсовых нитях на перегонах, оборудованных бесстыковыми ТРЦ с уравнивающими дросселями и без них. Проведены исследования изменения асимметрии тягового тока под катушками АЛС, показавшие, что наибольшее снижение асимметрии тягового тока при применении таких дросселей наблюдается, когда рельсовая линия обладает только поперечной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей. Уменьшение сопротивления рельсов по отношению к земле и/или рост частоты тягового тока снижает степень его уравнивания дросселями. Полученные результаты применены АО «НИИАС» при разработке и анализе РЦ в проектах оборудования в части мест установки уравнивающих дросселей.

9. Найдено, что в неоднородной рельсовой линии, оборудованной кодовой РЦ, ограниченной изолирующими стыками с ДТ, выбросы величины асимметрии тягового тока под катушками АЛС в зимний период могут происходить на участках с продольной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей, а в летний период – на участках с поперечной асимметрией этих сопротивлений.

10. Проверена корректность разработанной методики расчётов помех от тягового тока сравнением результатов, полученных с её использованием, с результатами натуральных экспериментов и результатами расчётов по другим методикам.

11. Разработан способ компенсации помех для приёмников сигналов РЦ и АЛС, обеспечивающий значительное уменьшение уровней помех на всех частотах мешающих сигналов.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ

4.1 Особенности измерений и контроля электрических параметров рельсовых линий

Целью классических измерений электрических параметров рельсовых линий является определение влияния их продольного и поперечного сопротивлений на величину сигнального напряжения на приёмнике РЦ или под локомотивными катушками АЛС [32]. При этом влияние помех от тягового тока на результаты измерений не учитываются или предлагается использовать приборы, обеспечивающие возможность проводить измерения на конкретных частотах, соответствующих частотам сигнальных токов.

Целью измерений и контроля в задачах ЭМС аппаратуры РЦ и АЛС с РТС является выявление причин увеличения интенсивности сбоев в работе этой аппаратуры при действии помех от тягового тока для разработки мер, обеспечивающих снижение этой интенсивности. К тому же процессы растекания тяговых и сигнальных токов по рельсовым линиям значительно различаются. Этим определяется необходимость дополнительной разработки способов электрических измерений в рельсовых линиях.

На рисунке 4.1 показано детальное разделение рельсовых линий на элементы, определяющие их электрическое сопротивление, а также растекание тяговых токов по этим элементам. Рельсовые нити с распределёнными параметрами представлены на схеме эквивалентными трёхполусниками с сосредоточенными параметрами в соответствии с пунктом 1.2.

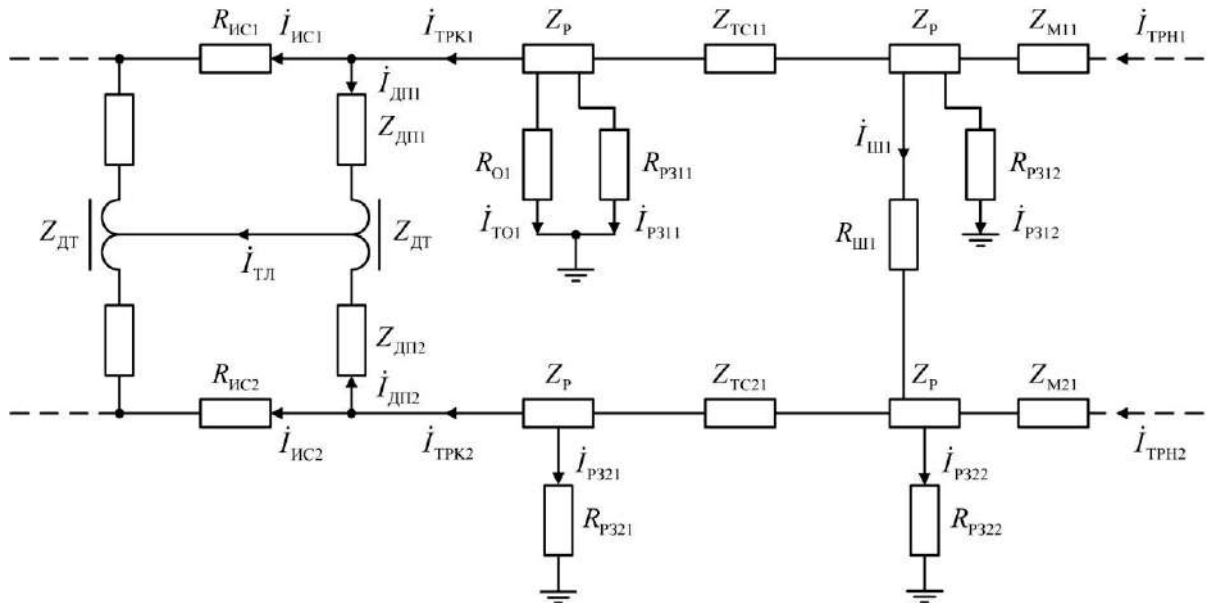


Рисунок 4.1 – Схема замещения фрагмента рельсовой линии с её токопроводящими и изолирующими элементами

На рисунке использованы следующие условные обозначения для первой и второй рельсовых нитей отрезка рельсовой линии:

Z_P – сопротивление сплошных рельсов;

$R_{Ш1}$ – сопротивление неисправной шпалы;

R_{O1} – сопротивление цепи заземления опоры контактной сети, подключаемой к рельсам;

Z_{M11} ; Z_{M21} – сопротивления взаимной индуктивности отрезков рельсовых нитей;

$Z_{ДП1}$; $Z_{ДП2}$ – сопротивления дроссельных перемычек;

R_{P311} ; R_{P312} ; R_{P321} ; R_{P322} – сопротивления по отношению к земле половин соответствующих отрезков в первой и второй рельсовых нитях;

$R_{ТС11}$; $R_{ТС21}$ – сопротивления токопроводящих стыков;

$R_{ИС1}$; $R_{ИС2}$ – сопротивления изолирующих стыков;

$i_{ТРН1}$; $i_{ТРК1}$; $i_{ТРН2}$; $i_{ТРК2}$ – тяговые токи в начале и конце отрезков первой и второй рельсовых нитей;

$\dot{I}_{\text{ДП1}}; \dot{I}_{\text{ДП2}}$ – тяговые токи в дроссельных перемычках;

$\dot{I}_{\text{ИС1}}; \dot{I}_{\text{ИС2}}$ – тяговые токи через изолирующие стыки;

$\dot{I}_{\text{О1}}$ – тяговый ток, утекающий из рельсов в землю по цепям заземления опор контактной сети;

$\dot{I}_{\text{Р311}}; \dot{I}_{\text{Р312}}; \dot{I}_{\text{Р321}}; \dot{I}_{\text{Р322}}$ – тяговые токи, утекающие из рельсов в землю;

$\dot{I}_{\text{Ш1}}$ – тяговый ток через неисправную железобетонную шпалу.

Величина асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в рельсовой линии и соответствующая величина асимметрии тягового тока в ней зависят в первую очередь от состояния токопроводящих и изолирующих элементов рельсовых линий. Поэтому первоочередными работами является проверка состояния многочисленных этих элементов при невозможности выделения элементов из рельсовых линий для измерения их электрического сопротивления.

Измерять величину тяговых токов в рельсовых дроссельных перемычках удобно электроизмерительными клещами или с использованием способа двух вольтметров [111]. Сложность измерения и контроля величины сопротивления токопроводящих рельсовых стыков усложняется малой величиной этого сопротивления и большим количеством таких стыков в звеньевом пути.

В настоящее время выпускается серийно измеритель сопротивления рельсовых стыков типа ИСПС-01/2. К его недостаткам можно отнести вес и ограничения по тяговому току. На загруженных перевальных участках переменный тяговый ток в рельсовой нити может значительно превышать это ограничение.

Измерять сопротивление токопроводящих рельсовых стыков удобно косвенным способом двух вольтметров [3], который вошел в Инструкцию [38]. Этот способ может быть использован и при диагностике состояния цепей заземления на рельсы опор контактной сети, поскольку его использование не требует выполнения требований при проведении измерений в высоковольтных сетях [93].

Остаются нерешёнными проблемы с измерениями продольного и поперечного сопротивлений рельсовых линий для переменного тягового тока, с автоматическим контролем состояния изолирующих стыков на границах тональных рельсовых цепей и с автоматическим контролем излома рельсов.

4.2 Способ измерения электрических сопротивлений рельсовых нитей в неоднородных рельсовых линиях

Реально рельсовые линии обычно характеризуются неравномерным распределением сопротивлений рельсовых нитей по их длине, что вызывает изменения асимметрии тягового тока под приёмными локомотивными катушками АЛС при движении поезда. Для выявления причин повышенной интенсивности сбоев на конкретных участках необходимо знать, как распределяются величины продольных и поперечных электрических сопротивлений рельсовых нитей по длине рельсовой линии. Классические методы измерений в РЦ не позволяют решить эту задачу.

Поэтому был разработан способ, позволяющий измерять сопротивления отрезков рельсовых нитей в неоднородных рельсовых линиях на выбранном участке пути с использованием тяговых токов в рельсах в качестве информационных сигналов [90].

Схемы замещения отрезков рельсовых нитей представляются в виде трёхполюсников. Измерения в рельсовой нити выполняются в двух режимах её работы по тяговому току – в нормальном режиме и при коротком замыкании рельсов на землю в конце измеряемого отрезка рельсовой нити [88].

Измеряемые токи и напряжения при работе отрезка рельсовой нити в нормальном режиме показаны на рисунке 4.2, *а*, а при коротком замыкании рельсов на землю на выходном для тягового тока конце рельсовой нити эти токи и напряжения показаны на рисунке 4.2, *б* [63].

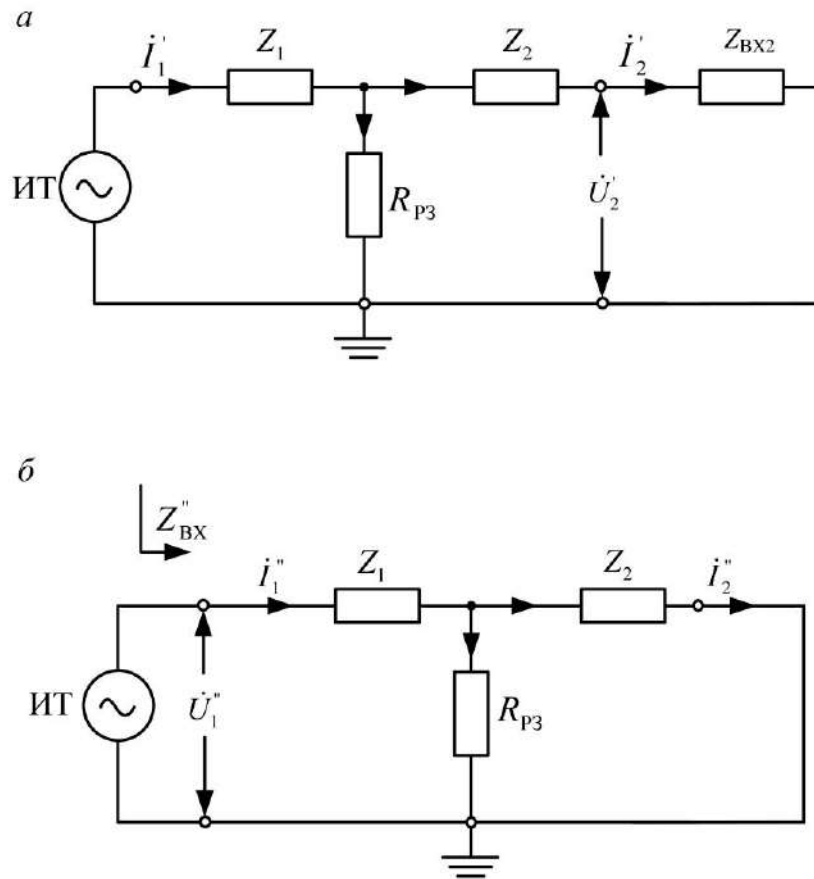


Рисунок 4.2 – Схема замещения рельсовой нити: при работе в нормальном режиме (*а*), при коротком замыкании рельсов на землю на выходном конце рельсовой нити (*б*)

На рисунках приняты следующие обозначения:

Z_1 и Z_2 – сопротивления рельсов половин отрезков рельсовых нитей в составе рассматриваемого участка рельсовой линии (в общем случае их величины могут быть различными);

R_{p3} – поперечное сопротивление между рельсами и землёй, распределённое по длине отрезка рельсовой нити;

Z_{BX2} – входное по отношению к земле сопротивление участка рельсовой нити, примыкающей к отрезку;

i'_1 – тяговый ток, втекающий в рассматриваемый отрезок рельсовой нити (рисунок 4.2, *а*);

\dot{I}'_2 – тяговый ток, вытекающий из рельсов (рисунок 4.2, *a*);

\dot{U}'_2 – напряжение между рельсами и удалённой землёй на выходном конце отрезка рельсовой нити (рисунок 4.2, *a*);

\dot{I}''_1 – тяговый ток, втекающий в рассматриваемый отрезок рельсовой нити (рисунок 4.2, *б*);

\dot{I}''_2 – тяговый ток, вытекающий из рельсов при их коротком замыкании на землю (рисунок 4.2, *б*);

\dot{U}''_1 – напряжение между рельсами и землёй на входном конце отрезка рельсовой нити в режиме короткого замыкания (рисунок 4.2, *б*).

Используя измеренные значения токов и напряжений, находят величину электрических сопротивлений отрезка рассматриваемой рельсовой нити. Входное сопротивление между рельсами и землёй рельсовой нити, примыкающей к концу рассматриваемого отрезка (рисунок 4.2, *a*), составляет:

$$Z_{\text{BX2}} = \frac{\dot{U}'_2}{\dot{I}'_2}. \quad (4.1)$$

Тяговый ток \dot{I}_1 , растекающийся от средней точки трёхполюсника, обратно пропорционален сопротивлениям ветвей [108]. Поэтому значение выходного тока в рельсах в схеме (см. рисунок 4.2, *a*) можно вычислить по формуле:

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}'_1 \frac{R_{\text{P3}}}{Z_2 + Z_{\text{BX2}} + R_{\text{P3}}}. \quad (4.2)$$

Выходной ток для схемы (рисунок 4.2, *б*) составляет:

$$\dot{I}''_2 = \dot{I}''_1 \frac{R_{\text{P3}}}{Z_2 + R_{\text{P3}}}. \quad (4.3)$$

Из формулы (4.2) следует, что

$$\dot{I}'_1 R_{\text{P3}} = \dot{I}'_2 Z_2 + \dot{I}'_2 Z_{\text{BX2}} + \dot{I}'_2 R_{\text{P3}}, \quad (4.4)$$

откуда

$$R_{\text{P3}} = \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_1 - \dot{I}'_2} Z_2 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_1 - \dot{I}'_2} Z_{\text{BX2}}. \quad (4.5)$$

Из формулы (4.3) определяем:

$$R_{\text{P3}} = \frac{\dot{I}''_2}{\dot{I}''_1 - \dot{I}''_2} Z_2. \quad (4.6)$$

Подставив значение R_{P3} из формулы (4.6) в формулу (4.4), получим:

$$\frac{(\dot{I}'_1 - \dot{I}'_2) \dot{I}''_2}{\dot{I}''_1 - \dot{I}''_2} Z_2 = \dot{I}'_1 Z_2 + \dot{I}'_2 Z_{\text{BX2}}. \quad (4.7)$$

Тогда значение сопротивления рельсов второй половины отрезка рельсовой нити с учетом (4.1) вычисляется по формуле:

$$Z_2 = \frac{\dot{I}''_1 - \dot{I}''_2}{2\dot{I}'_1 \dot{I}''_2 - \dot{I}'_1 \dot{I}''_1 - \dot{I}'_2 \dot{I}''_2} \dot{I}'_2 Z_{\text{BX2}} = \frac{\dot{I}''_1 - \dot{I}''_2}{2\dot{I}'_1 \dot{I}''_2 - \dot{I}'_1 \dot{I}''_1 - \dot{I}'_2 \dot{I}''_2} \dot{U}'_2. \quad (4.8)$$

По формуле (4.3) с использованием рассчитанного значения Z_2 вычисляем сопротивление отрезка рельсовой нити между рельсами и землёй:

$$R_{\text{P3}} = \frac{\dot{I}''_2}{\dot{I}''_1 - \dot{I}''_2} Z_2. \quad (4.9)$$

Схема отрезка рельсовой нити при коротком замыкании рельсов на землю (рисунок 4.2, б) состоит из сопротивления Z_1 , последовательно с которым включены параллельно соединенные сопротивления R_{p3} и Z_2 . Падение тягового напряжения на этих элементах составляет:

$$\dot{U}_1'' = \dot{I}_1'' \left(Z_1 + \frac{Z_2 R_{p3}}{Z_2 + R_{p3}} \right). \quad (4.10)$$

Следовательно, сопротивление рельсов первой половины отрезка рельсовой нити Z_1 при известных значениях R_{p3} и Z_2 можно найти по формуле:

$$Z_1 = \frac{\dot{U}_1''}{\dot{I}_1''} - \frac{Z_2 R_{p3}}{Z_2 + R_{p3}}. \quad (4.11)$$

Таким образом, предложенный способ позволяет путем несложных измерений и вычислений по их результатам найти значения продольных сопротивлений каждой из половин участка рельсовой нити, а также значение сопротивления между его рельсами и землёй на этом участке.

В этом случае численные значения сопротивлений рельсовой нити определяют по соотношению тяговых токов, протекающих по рельсам и утекающих в землю в её пределах. Поэтому найденные значения сопротивлений вполне адекватно отражают реальный процесс растекания тягового тока по отрезкам рельсовых нитей в неоднородной рельсовой линии.

4.3 Разработка способов контроля состояния изолирующих стыков

Одной из наиболее характерных причин отказов РЦ являются ухудшение или нарушение изоляции в изолирующих стыках. Эти отказы происходят из-за продав-

ливания торцевой изоляции в жаркую погоду, разрушения боковой фибровой изоляции, продавливания втулок и шайб. Средняя наработка изолирующего стыка по перевезённым грузам составляет 25-35 миллионов тонн.

Несимметричное ухудшение состояния изолирующих стыков приводит к увеличению асимметрии тягового тока в рельсовых нитях рельсовых линий, что увеличивает уровень помех от гармоник тягового тока в РЦ и в локомотивных приёмниках АЛС. В результате растёт количество сбоев в работе этой аппаратуры [111].

Симметричное ухудшение состояния изолирующих стыков усиливает кондуктивную связь между смежными РЦ. Поскольку такое ухудшение не контролируется, в конечном итоге оно приводит к пробоям изоляции рассматриваемых стыков и к появлению ложной занятости смежной РЦ вследствие шунтирования её приёмника колесными парами подвижного состава. Следствием является перекрытие светофора на запрещающее показание [95].

Измерение сопротивления изолирующих стыков каким-либо омметром невозможно, потому что они закорочены небольшими по величине поперечными сопротивлениями рельсовых нитей. Поэтому актуальна разработка способов и устройств, обеспечивающих контроль состояния изолирующих стыков и рельсовых нитей, где перспективным является контроль состояния изолирующего стыка косвенным способом – по относительной величине тока, протекающего через него.

Появление ложной занятости РЦ или увеличение интенсивности сбоев в работе АЛС может вызываться рядом причин. Диагностика того, что отказ именно изолирующих стыков вызвал отказ в работе РЦ или сбоев в работе АЛС является непростой задачей и часто занимает достаточно долгое время. Восстановление работоспособности отказавшего изолирующего стыка трудоёмко и занимает тоже достаточно много времени. Одним из путей повышения надёжности изолирующих стыков является своевременная фиксация их состояния, что позволяет снизить параметр потока отказов данных стыков в 4,7 раза для АБ и в 1,5 раза для ЭЦ [75, 91].

Для технического персонала, обслуживающего рельсовые цепи, важно знать не количественное значение сопротивления изолирующего стыка, продольного и

поперечного сопротивления рельсовых нитей, а того, насколько эти элементы близки к предельно допусжаемому состоянию, и как они повлияли на величину асимметрии тягового тока в рассматриваемом конце РЦ.

Известны устройства для измерения сопротивления изолирующих стыков. Устройство [1] обеспечивает получение требуемой точности измерений в рельсовых цепях любого типа, оно универсально. Но оно отличается относительно большой сложностью из-за необходимости использования специального генератора испытательного сигнала и дополнительного канала измерения.

В другом устройстве для контроля состояния изолирующих стыков [61] в качестве испытательного сигнала используется переменный тяговый ток, который ответвляется в изолирующий стык с пониженным сопротивлением. Его величина зависит от величины сопротивления изолирующего стыка.

Для контроля состояния изолирующих стыков, разделяющих РЦ, можно использовать особенности растекания тяговых токов в районе этих стыков [67]. Суть этого способа поясняет рисунок 4.3.

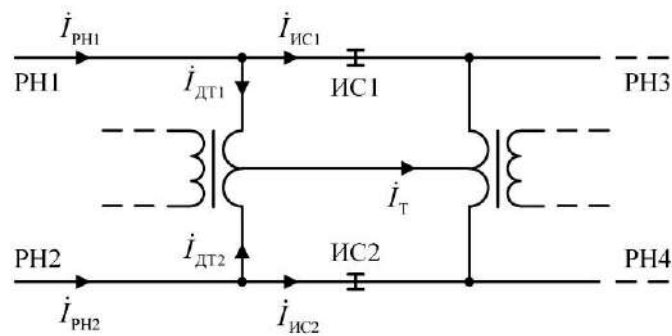


Рисунок 4.3 – Цепи протекания тяговых токов возле изолирующих стыков

Изолирующие стыки ИС1 и ИС2 разделяют соответственно рельсовую нить РН1 с рельсовой нитью РН3 и рельсовую нить РН2 с рельсовой нитью РН4. Тяговый ток из рельсовой нити РН1 $i_{РН1}$ разветвляется на ток $i_{ДТ1}$ через одну секцию

основной обмотки ДТ и на ток $\dot{I}_{\text{ИС1}}$ через ИС1. Соответственно тяговый ток из рельсовой нити РН2 $\dot{I}_{\text{РН2}}$ разветвляется на ток $\dot{I}_{\text{ДТ2}}$ через другую секцию основной обмотки ДТ и ток $\dot{I}_{\text{ИС2}}$ через второй изолирующий стык ИС2.

Следовательно, сопротивление изолирующего стыка ИС1 прямо пропорционально отношению величины тока $\dot{I}_{\text{ДТ1}}$ к величине тока $\dot{I}_{\text{ИС1}}$

$$\frac{\dot{I}_{\text{ДТ1}}}{\dot{I}_{\text{ИС1}}} = \frac{\dot{I}_{\text{РН1}} - \dot{I}_{\text{ИС1}}}{\dot{I}_{\text{ИС1}}} = \frac{\dot{I}_{\text{РН1}}}{\dot{I}_{\text{ИС1}}} - 1, \quad (4.12)$$

а сопротивление изолирующего стыка ИС2 прямо пропорционально отношению величины тока $\dot{I}_{\text{ДТ2}}$ к величине тока $\dot{I}_{\text{ИС2}}$

$$\frac{\dot{I}_{\text{ДТ2}}}{\dot{I}_{\text{ИС2}}} = \frac{\dot{I}_{\text{РН2}} - \dot{I}_{\text{ИС2}}}{\dot{I}_{\text{ИС2}}} = \frac{\dot{I}_{\text{РН2}}}{\dot{I}_{\text{ИС2}}} - 1. \quad (4.13)$$

Таким образом, возрастание соотношения $\dot{I}_{\text{ИС1}}/\dot{I}_{\text{РН1}}$, т.е. относительного значения величины тягового тока через изолирующий стык ИС1, можно использовать как сигнал об ухудшении состояния данного изолирующего стыка, а увеличение соотношения $\dot{I}_{\text{ИС2}}/\dot{I}_{\text{РН2}}$ – об ухудшении состояния другого изолирующего стыка ИС2. Значение асимметрии тягового тока принято положительным, когда величина тягового тока в РН1 больше, чем в РН2, а отрицательным – когда величина тягового тока больше в РН2.

Технически реализовать данный способ можно с использованием устройства, структурная схема которого приведена на рисунке 4.4 [67]. Устройство снабжено четырьмя выпрямителями, четырьмя усилителями с регулируемым коэффициентом усиления, двумя сумматорами, вычитателем, двумя делителями напряжения, семью блоками сигнализации, семью пороговыми элементами и семью контактами для подключения устройства к рельсовой линии.

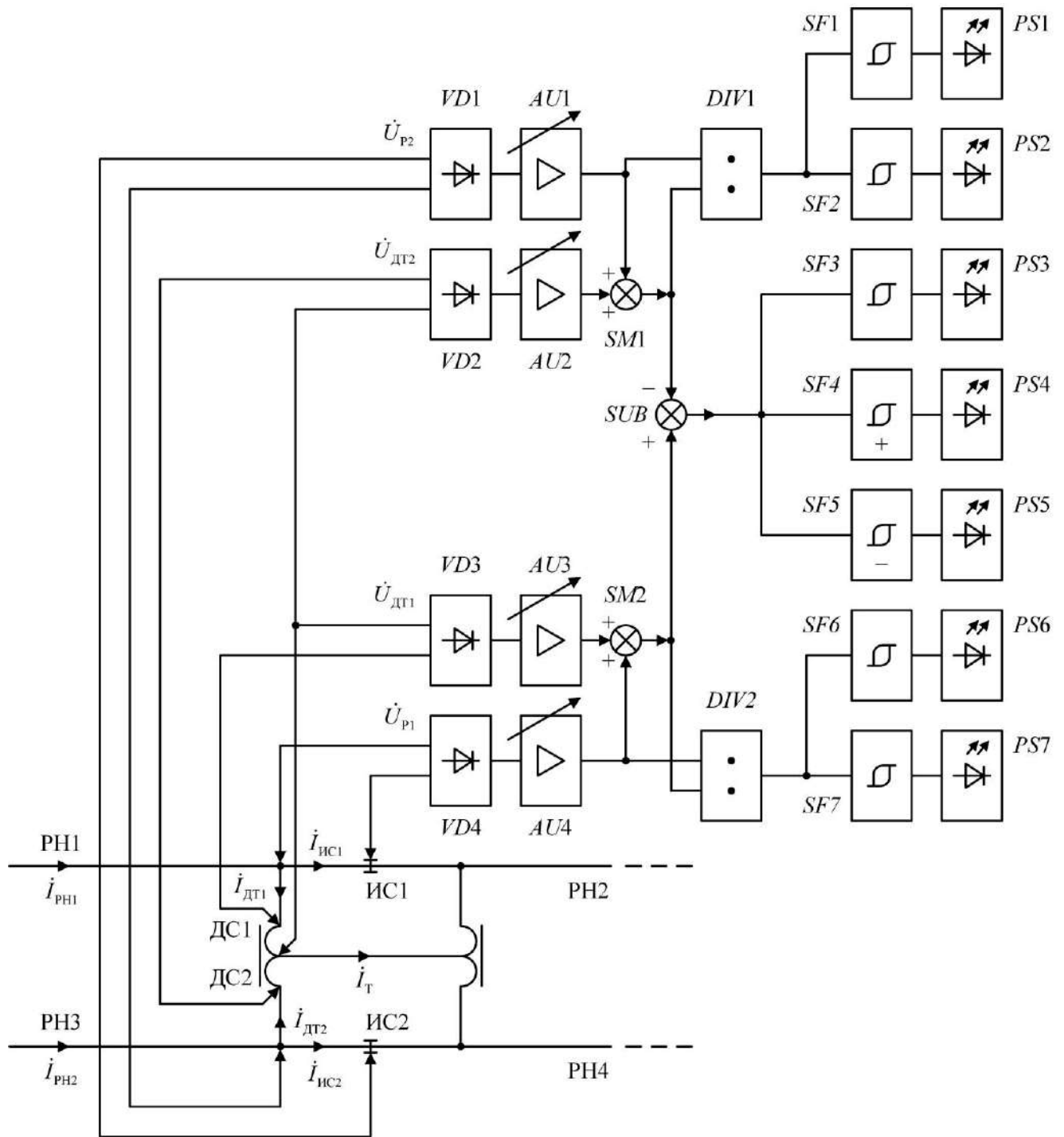


Рисунок 4.4 – Структурная схема устройства для контроля состояния изолирующих стыков на участках с электротягой

Изолирующие стыки ИС1 и ИС2 разделяют соответственно рельсовую нить РН1 с рельсовой нитью РН2 и рельсовую нить РН3 с рельсовой нитью РН4. Тяговый ток i_{PH1} в рельсовой нити РН1 возле изолирующего стыка ИС1 разветвляется

на ток $\dot{I}_{\text{ДТ1}}$ через одну секцию ДС1 основной обмотки ДТ и на ток $\dot{I}_{\text{ИС1}}$ через изолирующий стык ИС1, а тяговый ток $\dot{I}_{\text{РН2}}$ рельсовой нити РНЗ возле изолирующего стыка ИС2 разветвляется на ток $\dot{I}_{\text{ДТ2}}$ через другую секцию ДС2 основной обмотки ДТ и ток $\dot{I}_{\text{ИС2}}$ через изолирующий стык ИС2.

Падение напряжения $\dot{U}_{\text{р1}}$ на участке рельса длиной Δl от изолирующего стыка ИС1 до места подключения к рельсу ближайшей дроссельной перемычки подаётся на вход выпрямительного устройства $VD4$, подключённого своим выходом к входу усилителя $AU4$ с регулируемым коэффициентом усиления. Выход усилителя $AU4$ соединён с первыми входами сумматора $SM2$ и делителя напряжения $DIV2$.

Падение напряжения $\dot{U}_{\text{р2}}$ на участке рельса длиной Δl от изолирующего стыка ИС2 до места подключения к рельсу ближайшей дроссельной перемычки подаётся на вход выпрямительного устройства $VD1$, подключённого своим выходом к входу усилителя $AU1$ с регулируемым коэффициентом усиления. Выход усилителя $AU1$ соединён со первыми входами сумматора $SM1$ и делителя напряжения $DIV1$.

Падение напряжения $\dot{U}_{\text{ДТ1}}$ на секции ДС1 основной обмотки ДТ подаётся на вход выпрямительного устройства $VD3$, подключённого своим выходом к входу усилителя $AU3$ с регулируемым коэффициентом усиления. Выход усилителя $AU3$ соединён со вторым входом сумматора $SM2$, выход которого подключён к первому входу вычитателя SUB и ко второму входу делителя напряжения $DIV2$, сигнал с выхода которого через пороговый элемент $SF6$ подаётся на блок сигнализации $PS6$, а через пороговый элемент $SF7$ подаётся на блок сигнализации $PS7$.

Падение напряжения $\dot{U}_{\text{ДТ2}}$ на секции ДС2 основной обмотки ДТ подаётся на вход выпрямительного устройства $VD2$, подключённого своим выходом к входу усилителя $AU2$ с регулируемым коэффициентом усиления. Выход усилителя $AU2$ соединён со вторым входом сумматора $SM2$, выход которого подключен ко вторым входам вычитателя SUB и делителя напряжения $DIV2$, сигнал с выхода которого

через пороговый элемент $SF1$ подаётся на блок сигнализации $PS1$, а через пороговый элемент $SF2$ подаётся на блок сигнализации $PS2$.

Выходной сигнал вычитателя SUB через пороговые элементы $SF3$, $SF4$ и $SF5$ поступает на входы блоков сигнализации, соответственно, $PS3$, $PS4$ и $PS5$. Особенностями пороговых элементов $SF4$ и $SF5$ является то, что пороговый элемент $SF4$ реагирует на величину сигнала положительной полярности, а пороговый элемент $SF5$ реагирует на величину сигнала отрицательной полярности.

Блоки сигнализации $PS6$ и $PS7$ дают визуальную информацию соответственно о предотказном состоянии или при отказе изолирующего стыка ИС1, а блоки сигнализации $PS1$ и $PS2$ дают визуальную информацию соответственно о предотказном состоянии или при отказе изолирующего стыка ИС2.

Блок сигнализации $PS3$ даёт визуальную информацию о превышении величиной асимметрии тягового тока на этом конце рельсовой цепи допустимого значения. При этом если величина тягового тока в рельсовой нити РН1 больше, чем в рельсовой нити РН3, то срабатывает блок сигнализации $PS4$, а если величина тягового тока больше в рельсовой нити РН3, то срабатывает блок сигнализации $PS5$.

Устройство обеспечивает не только контроль состояния изолирующих стыков, но и сигнализирует о тех случаях, когда асимметрия тягового тока в рельсовой линии возле этих стыков превышает допустимую величину, давая также информацию о том, как при этом соотносятся величины тяговых токов в рельсовых нитях.

Предложенный способ позволяет при применении достаточно простых технических средств автоматизировать процесс контроля состояния изолирующих стыков на участках с электрической тягой.

Изолирующие стыки на станциях в ТРЦ обеспечивают фиксацию границ между контролируемыми участками путей: приёмоотправочными путями, стрелочными и бесстрелочными секциями, тупиками. В тональных смежных РЦ частоты сигнального тока различны, что позволяет осуществить автоматический контроль состояния изолирующих стыков более простым способом.

При ухудшении состояния изолирующих стыков растёт утечка сигнального тока из влияющей рельсовой цепи в рельсовую цепь, подверженную влиянию [31].

В результате этого соотношение сигнального тока одной частоты в смежных ТРЦ свидетельствует о состоянии разделяющих их изолирующих стыков.

На рисунке 4.5 приведена структурная схема устройства, реализующего данный способ [62]. Смежные станционные ТРЦ1 с несущей частотой сигнального тока f_1 и ТРЦ2 с несущей частотой сигнального тока f_2 разделены изолирующими стыками ИС1, ИС2 и снабжены дроссель-трансформаторами ДТ1 и ДТ2, к которым подключены передатчики и/или приёмники ПП и ППр смежных РЦ соответственно ТРЦ1, ТРЦ2, настроенные на несущие частоты соответственно f_1, f_2 этих РЦ.

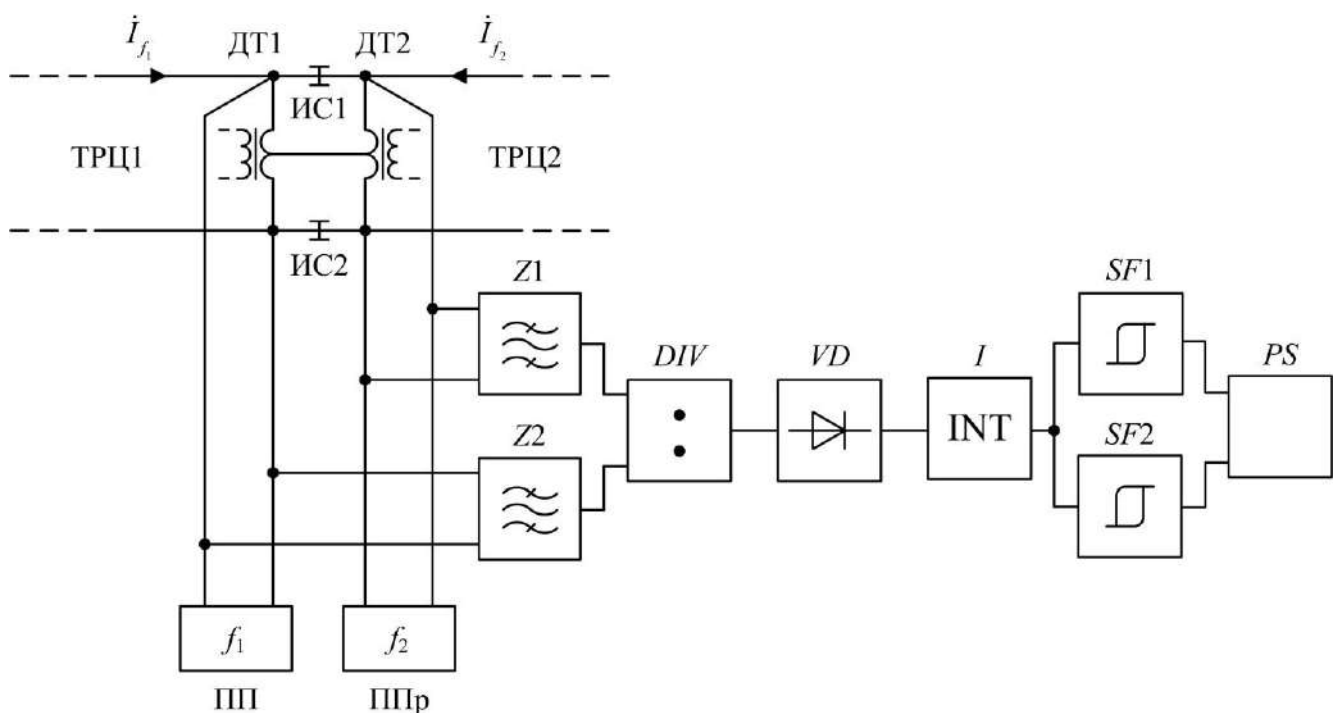


Рисунок 4.5 – Структурная схема устройства для контроля состояния изолирующих стыков в тональных рельсовых цепях

Устройство снабжено двумя полосовыми фильтрами Z_1 и Z_2 , настроенными на пропуск сигнального тока с частотой одной из смежных РЦ. На схеме показан вариант, когда на вход фильтра Z_2 подаётся снимаемое с передатчика и/или приёмника ТРЦ1 напряжение с несущей сигнальной частотой f_1 . На вход фильтра Z_1 подаётся напряжение той же частоты f_1 , снимаемое с передатчика и/или приёмника

ТРЦ2, подключенного по другую сторону от изолирующих стыков ИС1 и ИС2. Выходные сигналы полосовых фильтров $Z1$ и $Z2$ подаются на входы делителя напряжения DIV , соединённого своим выходом через выпрямительное устройство VD и интегратор I с пороговыми элементами $SF1$ и $SF2$, один из которых $SF1$ срабатывает при наступлении предотказного состояния изолирующих стыков, а другой $SF2$ срабатывает при пробое изолирующих стыков. Выходные сигналы пороговых элементов подаются на блок сигнализации PS .

Использование разработанного способа позволяет при применении достаточно простых технических средств автоматизировать процесс контроля состояния изолирующих стыков в ТРЦ.

4.4 Разработка способов автоматического контроля излома рельсов на участках с электротягой

Проблема обнаружения изломов рельсов и передачи сообщений об этом остаётся одной из важных проблем на железных дорогах мира [71, 113]. Автоматический контроль излома рельсов в настоящее время обеспечивается контрольным режимом работы РЦ.

При работе РЦ в контрольном режиме излом рельса обнаруживается при полном электрическом разрыве [8]. Это ответственный режим работы рельсовой цепи, расчёты которого требуют использования достаточно сложного математического аппарата, поэтому расчёты проводятся на ЭВМ при целом ряде допущений и упрощений. Например, считается, что продольное и поперечное сопротивления рельсовых нитей одинаковы и не меняются по их длине, в месте излома электрического контакта между обломками рельса нет. Не учитываются сопротивление взаимной индуктивности рельсов и соединения РЦ со смежными цепями через средние точки ДТ [18, 19]. Регулировка рельсовой цепи для выполнения найденных требований также относительно сложна. Если электрический контакт в месте излома рельса остаётся, пусть и с высоким сопротивлением, то путевой приёмник может не среагировать на появившийся излом. К тому же излом рельсов происходит обычно при

движении поезда по рельсовой цепи, «под колёсами». В эти промежутки времени рельсовая цепь зашунтирована колесными парами поезда, и поэтому она на излом рельса не реагирует.

Для повышения достоверности получаемой информации предложен ряд способов. В одном способе, например, предлагается использовать возимую аппаратуру РЦ, размещаемую в хвосте поезда, с использованием в ней контрольного режима [64]. Однако отмеченные выше недостатки не устраняются, техническая реализация этого способа достаточно сложна и контроль ведётся только для одного поезда.

Интенсивность движения поездов наиболее высока на электрифицированных участках железных дорог [109]. На таких участках растут скорость, интенсивность движения тяжеловесных и удлинённых поездов. В результате этого механические нагрузки на верхнее строение пути на таких участках увеличиваются, что повышает вероятность излома рельсов. Тяжелее на таких участках и последствия от аварий и крушений, отчего растут требования к своевременности обнаружения излома рельсов.

Повысить своевременность и достоверность информации об изломе рельса на таких участках железных дорог можно при использовании тяговых токов в рельсах в качестве информационного сигнала. Суть предлагаемого способа контроля излома рельсов [132] заключается в следующем. Тяговый ток электровоза растекается по рельсовой линии в обе стороны от него [127]. Если излом рельса происходит при отсутствии подвижного состава в пределах рельсовой цепи, то сопротивление рельсовой нити, в которой произошёл излом, резко увеличивается и тяговый ток в этой рельсовой нити скачкообразно уменьшается, что вызывает скачкообразное увеличение асимметрии тягового тока в рельсовой линии на обоих концах рельсовой цепи.

На участках с электротягой переменного тока в условиях эксплуатации максимальное зафиксированное значение коэффициента асимметрии тягового тока не превышало 0,15 – 0,16 [127]. Вызывается эта асимметрия неодинаковыми изменениями входных для тягового тока продольных и поперечных сопротивлений рельсовых нитей в неоднородных рельсовых линиях.

Полный разрыв рельсов в рельсовой нити приводит к уменьшению практически до нуля величины тягового тока в ней, вызывая увеличение коэффициента асимметрии тягового тока до единицы. Это справедливо для участков с электротягой постоянного тока, а также для участков с электротягой переменного тока при высоких значениях удельного сопротивления рельсов по отношению к земле.

Тяговый ток активно стекает из рельсов в землю, поэтому величина тягового тока в рельсовой нити с лопнувшим рельсом не уменьшается до нуля, а зависит от длины отрезка рельсовой нити между ДТ и местом излома и величины её удельного сопротивления по отношению к земле. Наиболее сложные условия с точки зрения влияния излома рельса на изменения коэффициента асимметрии переменного тягового тока, когда в длинной рельсовой цепи излом рельса происходит посередине одной из рельсовых нитей.

Отрезок рельсовой нити с лопнувшим рельсом от места втекания в рельсовую нить тягового тока до места излома удобно представлять схемой замещения Кауэра, а входное сопротивление этого отрезка вычислять по формуле ступенчатой дроби. Найденный по такой методике модуль входного сопротивления такого отрезка длиной 1 км до места излома с полной потерей электрического контакта при рельсах типа Р65, величине удельного сопротивления изоляции рельсовой нити по отношению к земле $0,5 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ составляет величину порядка $0,13 \text{ Ом}$ [130].

Минимальное значение коэффициента асимметрии тягового тока в таких условиях составляет $0,22$. Действие взаимной индуктивности между рельсовыми нитями рельсовой линии увеличивает асимметрию тягового тока в ней примерно в два раза, что повышает чувствительность предлагаемого способа к излому рельсов. Следовательно, устойчивое увеличение асимметрии переменного тягового тока в рельсовой линии выше $0,4$ сигнализирует об изломе рельса в одной из её рельсовых нитей. Появление асимметрии выше $0,4$ может сигнализировать об изломе рельса с неполным его разрывом.

Тяговый ток электровоза растекается по рельсовой линии в обе стороны от него. Если излом рельса происходит при отсутствии подвижного состава в пределах рельсовой цепи, то сопротивление рельсовой нити, в которой произошел излом,

резко увеличивается, и тяговый ток в этой рельсовой нити скачкообразно уменьшается, вызывая скачкообразное увеличение асимметрии тягового тока в рельсовой линии на обоих концах рельсовой цепи.

Колесные пары подвижного состава выравнивают тяговые токи в рельсовых нитях под составом. Поэтому, если излом рельса произошёл под подвижным составом, то скачок асимметрии тягового тока возникает в освобождающейся от подвижного состава части рельсовой линии, когда последняя колесная пара подвижной единицы или поезда уходит за точку излома рельса. На выходном конце рельсовой цепи величина асимметрии тягового тока изменяется скачком, когда последняя колесная пара поезда или подвижной единицы освобождает рельсовую цепь.

Таким образом, скачкообразное изменение асимметрии тягового тока на концах рельсовых цепей может служить сигналом об изломе рельса в их пределах. Следовательно, непрерывный контроль не только величины, но и скорости изменения во времени асимметрии тягового тока на концах рельсовых цепей может обеспечить контроль излома рельсов на участках с электротягой переменного тока в дополнение к контрольному режиму рельсовой цепи или взамен него.

Коэффициент асимметрии тягового тока увеличивается относительно медленно при ухудшении состояния токопроводящих и изолирующих элементов рельсовых нитей, а также при уменьшении температуры рельсов или величины тягового тока в них [133]. Такие изменения не должны давать ложную информацию об изломе рельса. Мощные импульсные электромагнитные помехи могут вызвать кратковременное увеличение коэффициента асимметрии тягового тока. В таких случаях также не должна появляться ложная информация об изломе рельса.

Технически реализовать данный способ можно с использованием устройства, структурная схема которого приведена на рисунке 4.6 [65]. Устройство содержит два измерительных трансформатора, два пороговых элемента, два выпрямительных элемента, элемент сравнения, сумматор, делитель напряжения, логический элемент «И». Устройство дополнительно снабжено дифференцирующим устройством, элементом задержки и блоком фиксации излома рельса. Данное устройство

должно отвечать требованиям к неразрушающему контролю железнодорожных рельсов в условиях эксплуатации [27].

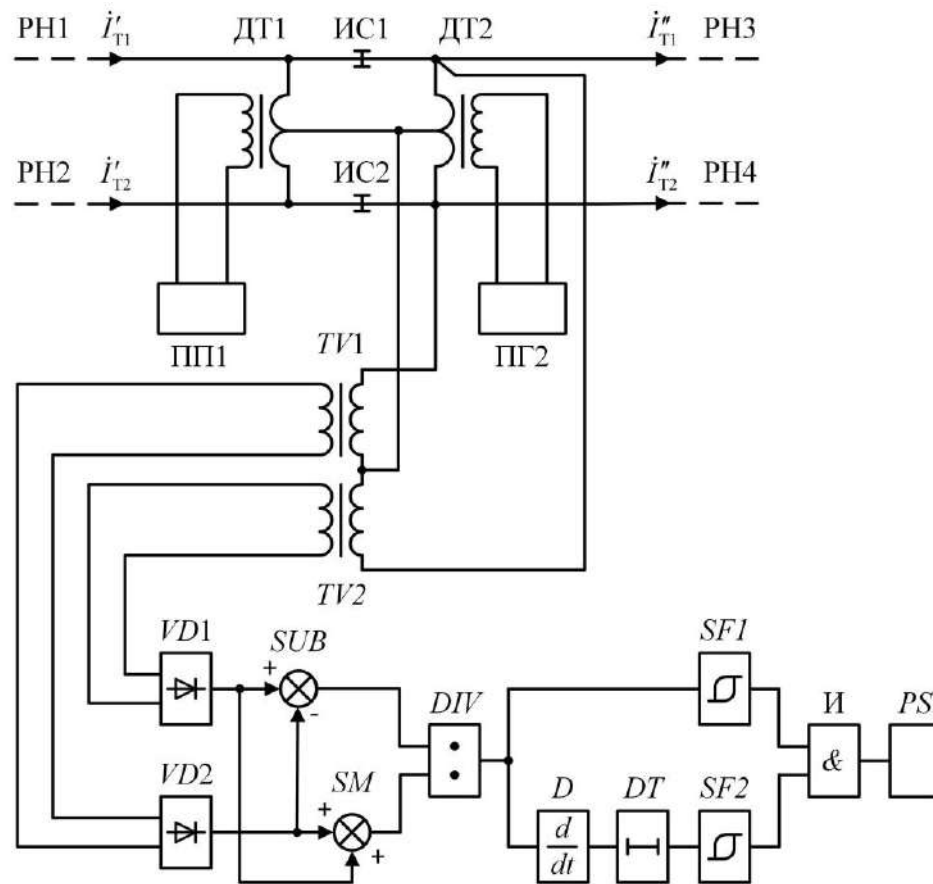


Рисунок 4.6 – Схема устройства для автоматического контроля излома рельса

Рельсовые нити РН1, РН2 и РН3, РН4 рельсовой линии на границах рельсовых цепей разделяются электрически изолирующими стыками соответственно ИС1 и ИС2, а дроссель-трансформаторы ДТ1 и ДТ2 обеспечивают протекание тяговых токов в рельсовых линиях в обход этих стыков. К дополнительным обмоткам ДТ подключена аппаратура смежных рельсовых цепей ПП1 и ПП2. Тяговые токи I'_{T1} и I'_{T2} в рельсовых нитях РН1 и РН2 до изолирующих стыков не равны по величине соответственно тяговым токам I''_{T1} и I''_{T2} в рельсовых нитях РН3 и РН4 после изолирующих стыков.

Падения напряжения на секциях основных обмоток ДТ прямо пропорциональны величинам тяговых токов, текущих по концам рельсовых нитей каждой

рельсовой цепи. Величина тягового тока I''_{T1} , текущего по рельсовой нити РН3, контролируется измерительным трансформатором $TV2$, подключенным к верхней на рисунке 4.6 секции основной обмотки ДТ2. Измерение тягового тока I''_{T2} , текущего по рельсовой нити РН4, к другой секции основной обмотки этого ДТ, обеспечивает измерительный трансформатор $TV1$.

Вторичная обмотка измерительного трансформатора $TV2$ подключена к входу выпрямительного элемента $VD1$, а вторичная обмотка измерительного трансформатора $TV1$ подключена к входу выпрямительного элемента $VD2$. Выходные сигналы выпрямительных элементов $VD1$ и $VD2$ подаются на соответствующие входы вычитателя SUB и сумматора SM .

Отношение выходных сигналов вычитателя SUB и сумматора SM находится с использованием делителя напряжений DIV . Выходной сигнал делителя напряжений DIV подаётся на вход первого порогового элемента $SF1$, а через дифференцирующее устройство D и элемент задержки DT подаётся на вход второго порогового устройства $SF2$. Выходы пороговых устройств $SF1$ и $SF2$ подключены к входам логического элемента «И», выход которого соединён с блоком фиксации излома рельса PS .

В результате выходные сигналы выпрямительных элементов $VD1$ и $VD2$ оказываются пропорциональными величинам тяговых токов соответственно I''_{T1} и I''_{T2} . Сигналы на выходах вычитателя SUB и сумматора SM пропорциональны соответственно разности и сумме величин этих токов, а сигнал на выходе делителя напряжения DIV пропорционален текущему значению коэффициента асимметрии тягового тока в рельсовых нитях РН3 и РН4.

Пороговый элемент $SF1$ настраивается на определенную предельную величину коэффициента асимметрии тягового тока в рельсовых нитях РН3 и РН4. Сигнал на его выходе появляется тогда, когда величина этого коэффициента превышает установленное пороговое значение.

Исключение ложных срабатываний устройства при медленных изменениях асимметрии тягового тока в рельсовой цепи или при появлении в ней мощных импульсных помех обеспечивает вторая цепь передачи сигнала с выхода делителя напряжений DIV на второй вход логического элемента «И».

Сигнал на выходе дифференцирующего устройства D пропорционален скорости изменения сигнала на выходе делителя напряжения DIV , т.е. пропорционален скорости изменения коэффициента асимметрии тягового тока в рельсовой цепи. При медленных изменениях величины этого коэффициента выходной сигнал дифференцирующего устройства DIV оказывается недостаточным для срабатывания второго порогового элемента $SF2$.

Появление в рельсовой цепи асимметрии тягового тока от мощной импульсной помехи вызывает появление сигнала на первом входе логического элемента «И», а также может вызвать появление на выходе дифференцирующего устройства D сигнала, достаточного для срабатывания второго порогового элемента $SF2$. Элемент задержки DT настраивается таким образом, чтобы время задержки сигнала, появляющегося на выходе дифференцирующего устройства DIV , было больше максимально возможной длительности импульсной помехи. В результате сигнал с выхода второго порогового элемента $SF2$ подается на второй вход логического элемента «И» тогда, когда на первом его входе сигнал уже исчезает.

При одновременном появлении сигналов с выходов пороговых элементов $SF1$ и $SF2$ на входе логического элемента «И» на его выходе появляется сигнал, вызывающий срабатывание блока фиксации излома рельса PS . Этот сигнал выдает обслуживающему персоналу визуальную информацию об изломе рельса и формирует сигнал в систему автоматического контроля и удаленного мониторинга.

Для участков железных дорог без РЦ и с РЦ без ДТ техническая реализация данного способа контроля излома рельса осуществляется устройством, блок-схема которого приведена на рисунке 4.7 [68]. В этом случае рельсовые нити $RH1$ и $RH2$ снабжаются датчиками тока $S1$ и $S2$, подключенные к входам усилителей $AU1$ и $AU2$. Выходной сигнал усилителя $AU1$ подаётся на одни входы вычитателя SUB и сумматора SM , на другие входы которых подаётся выходной сигнал усилителя $AU2$.

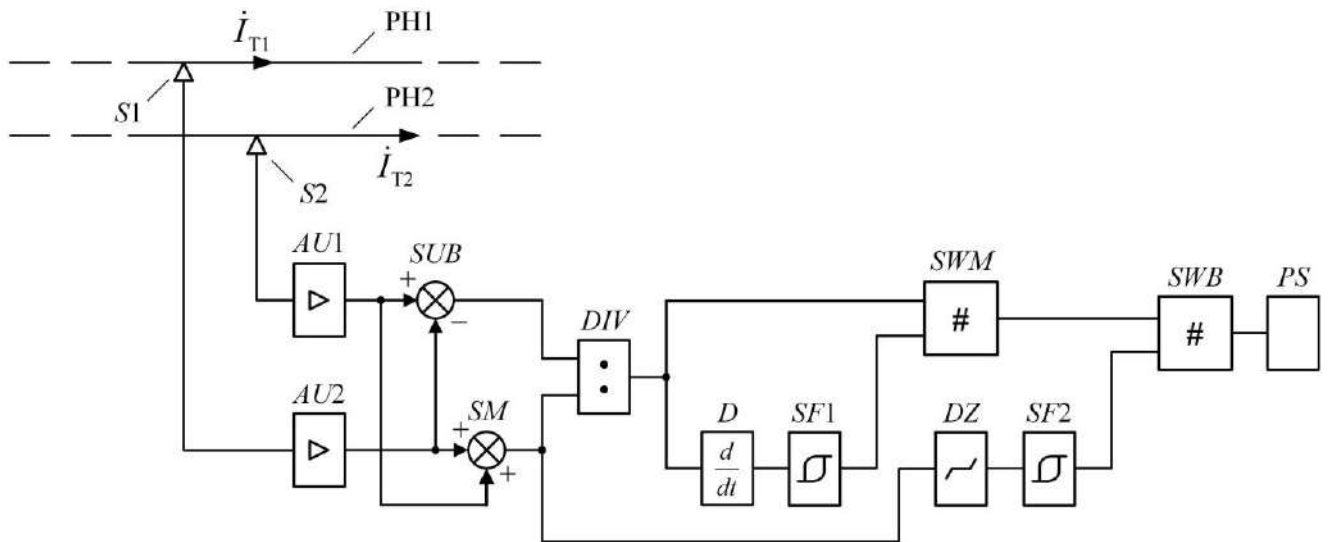


Рисунок 4.7 – Схема устройства для автоматического контроля излома рельса

Выход вычитателя *SUB* соединён с одним входом делителя напряжений *DIV*, а выход сумматора *SM* соединён с другим входом делителя напряжений *DIV* и с входом элемента с зоной нечувствительности *DZ*. Выходной сигнал элемента с зоной нечувствительности *DZ* через пороговый элемент *SF2* подаётся на управляющий вход размыкающего электронного ключа *SWB*, который пропускает через себя сигналы, если сигнал на его управляющем входе соответствует логическому нулю.

Величина выходного сигнала делителя напряжений *DIV* пропорциональна текущему значению коэффициента асимметрии тягового тока в рельсовых нитях PH1 и PH2. Этот сигнал подаётся на токовый вход замыкающего электронного ключа *SWM*, а через дифференцирующее устройство *D* и пороговый элемент *SF1* на управляющий вход ключа *SWM*. Ключ *SWM* не пропускает через себя сигналы, если сигнал на его управляющем входе эквивалентен логическому нулю. Выход ключа *SWM* через размыкающий электронный ключ *SWB* соединён с блоком фиксации излома рельса *PS*.

Таким образом, контролировать излом рельса на участках, как оборудованных, так и необорудованных рельсовыми цепями даже в случаях, когда в месте излома остается механический контакт, обладающий электрическим сопротивлением, можно с использованием разработанного способа, основанного на контроле величины асимметрии тягового тока в рельсовых нитях рельсовой линии.

4.5 Выводы по главе

1. Проведён анализ методов измерений и автоматического контроля для оценки состояния элементов рельсовых линий, позволивший выявить преимущества и недостатки существующих методов, а также пути их совершенствования.
2. Показано, что сложность измерений параметров рельсовых линий при конкретизации причин повышения интенсивности сбоев в работе аппаратуры РЦ и/или АЛС заключается в невозможности выделения элементов из рельсовых линий для измерения их электрического сопротивления и в многочисленности этих элементов.
3. Показано, что на участках железных дорог с электротягой источником информации об изменении состояния элементов рельсовых нитей может служить реакция на это изменение тяговых токов в рельсовых линиях.
4. Предложен способ косвенных измерений электрических сопротивлений неоднородных рельсовых нитей на участках с электротягой переменного тока, который обеспечивает возможность определения численных значений продольного сопротивления рельсов в первой и второй половине рассматриваемого отрезка рельсовой нити, а также их поперечного сопротивления. Использование данного способа позволяет выяснять причины повышенной интенсивности сбоев в работе аппаратуры РЦ и АЛС.
5. Разработан способ автоматического контроля состояния изолирующих стыков на электрифицированных участках железных дорог с использованием контроля изменения асимметрии тягового тока как информационного сигнала.
6. Предложен способ автоматического контроля состояния изолирующих стыков, разделяющих смежные ТРЦ с использованием контроля изменения соотношения их сигнальных токов как информационного сигнала.
7. Разработан способ автоматического обнаружения излома рельсов на электрифицированных участках железных дорог, как оборудованных, так необорудованных РЦ с использованием контроля изменения асимметрии тягового тока как информационного сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационного исследования получены следующие итоги, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Предложены и обоснованы методы и технические решения для оценки уровня помех от переменного тягового тока и способов защиты от данных помех, которые позволяют повысить уровень помехоустойчивости аппаратуры РЦ и АЛС.

2. Установлено, что существующие методы и технические средства не всегда обеспечивают требуемый уровень помехоустойчивости аппаратуры РЦ и АЛС на участках с электротягой переменного тока, а известные математические модели рельсовой линии не позволяют рассчитывать помехи от тяговых токов на РЦ и АЛС с одновременным учётом неоднородностей сопротивлений рельсовых нитей, влияния их взаимной индуктивности, а также поверхностного сопротивления рельсовой линии.

3. Получена модель рельсовой линии в виде каскадного соединения шести-полюсников, моделирующих её отрезки, которая позволяет в комплексе учитывать неоднородности сопротивлений рельсовых нитей по их длине, влияние их взаимной индуктивности, а также поверхностное сопротивление рельсовой линии. Определены предельно допустимые длины отрезков рельсовых нитей рельсовой линии с распределёнными параметрами, представленной каскадным соединением шести-полюсников с сосредоточенными параметрами, удовлетворяющие требуемой точности расчётов.

4. Получена система линейных уравнений, которая обеспечила возможность математического моделирования процессов растекания гармоник тягового тока по элементам однородных и неоднородных рельсовых линий в тяговой рельсовой сети для анализа причин его мешающего влияния на приёмники РЦ и АЛС.

5. Получены количественные зависимости величины асимметрии разных гармоник тягового тока по длине однородных и неоднородных рельсовых линий от состояния элементов рельсовых нитей при разных соотношениях величин и разному распределению продольной и поперечной асимметрии их сопротивлений по длине.

6. Предложен и обоснован критерий, позволяющий сравнить величины асимметрии гармоник переменного тягового тока в рельсовых нитях на перегонах, оборудованных бесстыковыми ТРЦ с уравнивающими дросселями и без них. Полученные результаты применены АО «НИИАС» при разработке и анализе РЦ в проектах оборудования в части мест установки уравнивающих дросселей.

7. Разработано решение и реализующие его технические устройства, позволяющие ослабить уровень помех от гармоник переменного тягового тока в приёмниках РЦ и АЛС за счёт их компенсации более, чем в два раза по сравнению с серийно выпускаемыми фильтрами.

8. Разработаны способы и технические решения на основе методов косвенных измерений и методов неразрушающего контроля для измерения сопротивлений отрезка рельсовой нити в конкретной точке пути и автоматического контроля состояния изолирующих стыков. Применение данных решений на практике позволит уменьшить параметр потока отказов изолирующих стыков не меньше, чем в 1,5 раза.

9. Разработан способ автоматического обнаружения излома рельсов не только при полном разрыве электрической цепи при использовании контроля изменения асимметрии тягового тока в рельсовых линиях как информационного сигнала. Данный способ может быть применён в дополнение к контрольному режиму работы РЦ или взамен него, а также на электрифицированных участках железных дорог, не оборудованных РЦ.

10. Рекомендуется применение разработанных способов косвенных измерений и автоматического контроля при техническом обслуживании РЦ для повышения достоверности выявления причин возрастания уровня помех от тягового тока на аппаратуру РЦ и АЛС, а также уменьшения времени действия этих причин.

11. Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является создание математической модели рельсовой сети, учитывающей мешающее влияние тяговых токов в смежных рельсовых линиях и в контактных проводах с последующим совершенствованием методики расчёта помех на приёмники РЦ и АЛС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 1284874 А1 СССР, МПК В61L 23/16. Устройство для измерения сопротивления изолирующих стыков рельсовых цепей / В.И. Шаманов, В.П. Михалдык, С.И. Шаманова, Л.В. Никулин. – № 3903545: заявл. 29.05.1985: опубл. 23.01.1987. – Бюл. № 3. – 3 с.
2. Авторское свидетельство № 1470595 А1 СССР, МПК В61L 3/20. Устройство автоматической локомотивной сигнализации / И.В. Киреев, П.Ф. Бестемьянов. – № 4244625: заявл. 15.05.1987: опубл. 07.04.1989. – Бюл. №13. – 3 с.
3. Авторское свидетельство № 1798729 А1 СССР, МПК G01R 27/00. Устройство для измерения сопротивления малой величины / В.И. Шаманов, К.С. Мухамеджанов, В.П. Михалдык, Л.В. Никулин, Б.М. Ведерников. – № 4851793: заявл. 16.07.1990: опубл. 28.02.1993. – Бюл. № 8. – 2 с.
4. Антонов, А.А. Методика расчёта уровня гармоник тягового тока смежного пути в примыкающих к тяговой подстанции рельсовых цепях с изолирующими стыками / А.А. Антонов, Е.В. Архипов, М.Е. Бакин // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 5 (59). – С. 41-47.
5. Антонов, А.А. Методика расчёта уровня гармоник тягового тока смежного пути в примыкающих к тяговой подстанции рельсовых цепях с изолирующими стыками и общим источником питания / А.А. Антонов, М.Е. Бакин, В.И. Линьков // Наука и техника транспорта. – 2016. – № 4. – С. 36-43.
6. Антонов, А.А. Повышение работоспособности станционных рельсовых цепей: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Антонов Антон Анатольевич. – Москва, 2005. – 24 с.
7. Антонов, А.А. Расчёт влияния гармоник тягового тока на рельсовую цепь / А.А. Антонов, М.Е. Бакин // Мир транспорта. – 2016. – Т. 14. – № 2 (63). – С. 30-36.
8. Аркатов, В.С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: Справочник / В.С. Аркатов, Ю.В. Аркатов, С.В. Казеев [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство «ООО Миссия-М», 2006. – 496 с.

9. Аркатов, В.С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В.С. Аркатов, Ю.А. Кравцов, Б.М. Степенский. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.
10. Ахмадуллин, Ф.Р. Имитационная модель помех в рельсовых и индуктивно-рельсовых линиях при электротяге постоянного тока / Ф.Р. Ахмадуллин, В.Б. Леушин, Р.Р. Юсупов // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 4 (64). – С. 42-45.
11. Бадёр, М.П. Электромагнитная совместимость / М.П. Бадёр // Учебник для вузов железнодорожного транспорта. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
12. Бакин, М.Е. Электромагнитная совместимость тональной рельсовой цепи с автоматическим регулированием уровня сигнала и тягового подвижного состава: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бакин Михаил Евгеньевич. – Москва, 2016. – 24 с.
13. Баранов, Л.А. Метод оценки изменения электромагнитной обстановки в местах функционирования систем интервального регулирования движения поездов / Л.А. Баранов, П.Ф. Бестемьянов, В.Г. Сидоренко, Е.Г. Щербина // Наука и техника транспорта. – 2013. – № 3. – С. 35-40.
14. Баранов, Л.А. Автоматизация измерения параметров рельсовых цепей / Л.А. Баранов, П.Ф. Бестемьянов, С.Е. Иконников // Наука и техника транспорта. – 2018. – № 3. – С. 8-11.
15. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 2003. – 462 с.
16. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А. Бессонов. – 11-е изд., исправ. и доп. – М.: Гардарики, 2007. – 638 с.
17. Болотский, Д.Н. Опыт внедрения систем интервального регулирования движения поездов на базе радиоканала на железных дорогах пространства 1520 / Д.Н. Болотский // Известия Академии электротехнических наук. – 2015. – № 1. – С. 72-76.
18. Брылеев А.М. Электрические рельсовые цепи. / А.М. Брылеев, Н.Ф. Котляренко. – М.: Транспорт, 1970. – 256 с.

19. Брылеев, А.М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А.М. Брылеев, Ю.А. Кравцов, А.А. Шишляков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1978. – 344 с.
20. Брылеев, А.М. Автоматическая локомотивная сигнализация и авторегулировка / А.М. Брылеев, О. Поупе, В.С. Дмитриев [и др.]. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.
21. Вахнин, М.И. Устройства СЦБ при электротяге переменного тока / М.И. Вахнин, Н.Ф. Пенкин, М.А. Покровский, Д.К. Пугин, А.А. Талыков // Тр. ВНИИЖТ. – Вып. 126. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – 220 с.
22. Воронин, В.А. Техническое обслуживание тональных рельсовых цепей: [учебное пособие] / В.А. Воронин, В.А. Коляда, Б.Г. Цукерман. – Москва: Учеб.-методический центр по образованию на ж.-д. трансп., 2007. – 92 с.
23. Воротилкин, А.В. Проблемы влияния тяжеловесных поездов на приборы безопасности при электротяге переменного тока / А.В. Воротилкин, А.П. Хоменко, В.И. Шаманов // Железнодорожный транспорт. – 2006. – № 10. – С. 17-21.
24. Гапанович, В.А. Методы и технические средства определения местоположения подвижного состава / В.А. Гапанович, В.И. Головин, В.И. Астрахан // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 2. – С. 10-13.
25. Гапанович, В.А. Повышение безопасности движения на основе применения на железных дорогах многофункциональных комплексных систем регулирования движения поездов / В.А. Гапанович, Е.Н. Розенберг, В.И. Талалаев // Труды ВНИИАС / Российский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи ВНИИАС. Том Выпуск 7. – Москва: ЗАО «Бизнес-Проект», 2007. – С. 3-7.
26. Горенбейн, Е.В. Электромагнитная совместимость тягового подвижного состава с устройствами интервального регулирования движения поездов: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Горенбейн Евгений Вячеславович. – Москва, 2011. – 24 с.

27. ГОСТ 34524-2019 Рельсы железнодорожные. Неразрушающий контроль в условиях эксплуатации. Общие требования. – Введ. 01.11.2019. – М.: Стандартинформ, – 2019. – 8 с.

28. ГОСТ Р 51317.2.5-2000 Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. – Введ. 13.12.2000. – М.: Издательство стандартов, – 2001. – 44 с.

29. Денежкин, Д.В. Влияние на уровень помех от тягового тока величины электрического сопротивления элементов рельсовых линий / Д.В. Денежкин // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: Материалы VI Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 125-летию РУТ (МИИТ). – М.: Перо, 2021. – С. 351-355.

30. Денежкин, Д.В. Изменения удельного сопротивления рельсовых нитей при промышленной частоте тока / Д.В. Денежкин // Труды Всероссийской научно-практической конференции Неделя науки - 2019, в двух частях, часть 1. – М.: РУТ (МИИТ), 2019. – Секция III. – С. 31.

31. Денежкин, Д.В. Контроль состояния изолирующих стыков в тональных рельсовых цепях / Д.В. Денежкин // Актуальные аспекты и приоритетные направления развития транспортной отрасли: материалы молодежного научного форума студентов и аспирантов транспортных вузов с международным участием, Санкт-Петербург, 14-15 ноября 2019 года. – Москва: Издательство «Перо», 2019. – С. 167-170.

32. Дмитренко, И.Е. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / И.Е. Дмитренко, Д.В. Дьяков, В.В. Сапожников. – М.: Транспорт, 1994. – 263 с.

33. Дьяков, А.Ф. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике: Учебник для вузов / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.

34. Дьяков, А.Ф. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике: учебник для вузов / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.

др.]; под ред. чл. -корр. РАН, докт. техн. наук, проф. А.Ф. Дьякова. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. – 543 с.

35. Зевеке, Е.Г. Основы теории цепей: Учебник для вузов / Е.Г. Зевеке, П.А. Ионкин. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1975. – 751 с.

36. Зенкович, Ю.И. Актуальные проблемы работоспособности рельсовых цепей в условиях электрической тяги поездов / Ю.И. Зенкович // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 1(79). – С. 54-59.

37. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. № ЦЭ-191. М-во путей сообщ. РФ. – М.: МПС, 2020. – 68 с.

38. Инструкция по защите железнодорожных подземных сооружений от коррозии блуждающими токами. № ЦЭ-518. М-во путей сообщ. РФ. – М.: Трансиздат, 1999. – 128 с.

39. Каллер, М.Я. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / М.Я. Каллер, Ю.В. Соболев, А.Г. Богданов. – М.: Транспорт, 1987. – 335 с.

40. Карни, Ш. Теория цепей. Анализ и синтез: переводное издание / Ш. Карни; пер. с англ.: Э.П. Горюнова, Е.А. Петрова, В.Г. Раутиана; ред. С.Е. Лондона. – М.: Связь, 1973. – 368 с.

41. Карякин, Р.Н. Тяговые сети переменного тока: 2-е изд., перераб. и доп. / Р.Н. Карякин. – М.: Транспорт, 1987. – 279 с.

42. Костроминов, А.М. Защита устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от помех / А.М. Костроминов. – М.: Транспорт, 1995. – 192 с.

43. Котельников, А.В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / А.В. Котельников, А.В. Наумов, А.П. Слободянюк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1990. – 215 с.

44. Котляренко, Н.Ф. Электрические рельсовые цепи: учебное пособие / Н.Ф. Котляренко. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 327 с.

45. Кравцов, Ю.А. Методика проверки помехоустойчивости приёмников тональных рельсовых цепей / Ю.А. Кравцов, А.А. Антонов, М.Е. Бакин // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13, № 6(61). – С. 102-109.
46. Кравцов, Ю.А. Расчёт влияния тягового тока на тональные рельсовые цепи без изолирующих стыков / Ю.А. Кравцов, П.Е. Мащенко Ю.А., Е.Г. Щербина // Вестник РГУПС №2. – Ростов н/Д: Рост. гос. ун-т путей сообщения. – 2007. – С. 47–54.
47. Кравцов, Ю.А. Электромагнитная совместимость рельсовых цепей и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / Ю.А. Кравцов // Автоматика на транспорте. – 2015. – №3. – С. 7–27.
48. Кравцов, Ю.А. Электромагнитное влияние перспективного электроподвижного состава на устройства железнодорожной автоматики: Учебное пособие / Ю.А. Кравцов, П.Е. Мащенко, Е.Г. Щербина. – М.: МИИТ, 2012. – 117 с.
49. Леонов, А.А. Техническое обслуживание автоматической локомотивной сигнализации / А.А. Леонов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1982. – 255 с.
50. Леушин, В.Б. Автоматическая локомотивная сигнализация при наличии помех рельсовых линий: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Леушин Виталий Бениаминович. – Москва, 1986. – 24 с.
51. Леушин, В.Б. Анализ причин сбоев в системы АЛСН / В.Б. Леушин, К.Э. Блачев, Р.Р. Юсупов // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – №4. – С. 20-25.
52. Лисенков, В.М. Автоматическая локомотивная сигнализация АЛС-ЕН / В.М. Лисенков, Д.В. Шалягин, Г.А. Казимов // Автоматика, телемеханика и связь. – 1987. – №11. – С. 26-29.
53. Лисенков, В.М. Теория автоматических систем интервального регулирования / В.М. Лисенков. – М.: Транспорт, 1987. – 150 с.
54. Лунев, С.А. Непрерывная оценка состояния обратной тяговой сети в условиях организации тяжеловесного движения / С.А. Лунев, С.С. Сероштанов, И.В. Присухина, А.Г. Ходкевич // Известия ТрансСиб, – 2017, – № 1. – С. 2–9.

55. Лызлов, М.С. Исследование и разработка параметрических рельсовых цепей: специальность 05.22.08 «Эксплуатация железнодорожного транспорта (включая системы сигнализации, централизации и блокировки)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лызлов Михаил Сергеевич. – Москва, 1995. – 24 с.

56. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: Учебник для студентов высших учебных заведений железнодорожного транспорта / К.Г. Марквардт. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

57. Мащенко, П.Е. Повышение работоспособности устройств интервального регулирования движения поездов с учетом уровня электромагнитных помех, создаваемых перспективным электроподвижным составом: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мащенко Павел Евгеньевич. – Москва, 2007. – 24 с.

58. Наумов, А.В. Выбор параметров и правила построения обратной тяговой рельсовой сети на электрифицированных железных дорогах со скоростным и тяжеловесным движением / А.В. Наумов, А.А. Наумов. – М.: Интекст, 2005. – 143 с.

59. Нормы технологического проектирования устройств автоматики и телемеханики на федеральном железнодорожном транспорте. НТП СЦБ / МПС – 99. С-Пб.: Гипротрансигналсвязь, 1999. – 76 с.

60. Офенгейм, Х.Г. Дроссели для выравнивания тока асимметрии в тональных рельсовых цепях / Х.Г. Офенгейм, Г.В. Орлов // Автоматика, связь, информатика. – 1999. – № 11. – С. 2–4.

61. Патент № 109723 С1 Российская Федерация, В61L 23/16. Устройство для контроля состояния изолирующих стыков в рельсовых цепях на участках с электротягой переменного тока / В.И. Шаманов, П.Н. Чабан; заявитель и правообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения»

(МИИТ) (RU). – № 2011114355/11: заявл. 14.04.2011; опубл. 27.10.2011. – Бюл. № 30. – 14 с.

62. Патент № 2668007 С1 Российская Федерация, МПК В61L 23/16. Устройство для контроля состояния изолирующих стыков в тональных рельсовых цепях / В.И. Шаманов, А.Е. Ваньшин, В.С. Кузьмин, Д.В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ) (RU). – № 2017139555: заявл. 14.11.2017; опубл. 25.09.2018; Бюл. №27. – 5 с.

63. Патент № 2695438 С1 Российская Федерация, МПК G01R 27/16, В61L 23/16. Способ измерения электрических сопротивлений неоднородных рельсовых нитей на электрифицированных участках железных дорог / В.И. Шаманов, А.Е. Ваньшин, Д.В. Денежкин, В.С. Кузьмин, Л. Тасболатова; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ) (RU). – № 2018136134: заявл. 12.10.2018; опубл. 23.07.2019; Бюл. №21. – 11 с.

64. Патент № 2706607 С1 Российская Федерация, МПК В61L 23/00. Способ контроля целостности рельсовых нитей с подвижного состава / Ю.И. Полевой, А.В. Горелик, Л.В. Мухин; заявитель и патентообладатель Полевой Юрий Иосифович. – № 2019105487: заявл. 27.02.2019; опубл. 20.11.2019. – Бюл. № 25. – 9 с.

65. Патент № 2748826 С1 Российская Федерация, МПК В61К 9/10, В61L 23/04. Устройство для контроля излома рельсов на участках с электротягой переменного тока / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта" (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)), РУТ (МИИТ) (RU). – № 2020138311: заявл. 23.11.2020; опубл. 31.05.2021. – Бюл. № 16. – 6 с.

66. Патент № 2754372 С1 Российская Федерация, МПК В61L 25/06. Компенсатор помех в гармоническом низкочастотном сигнале / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет

транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)) (RU). – № 2021108195: заявл. 26.03.2021; опубл. 01.09.2021, Бюл. № 25. – 7 с.

67. Патент № 2786253 С1 Российская Федерация, МПК В61L 23/16, СПК В61L 23/165. Устройство для контроля состояния изолирующих стыков при электротяге переменного тока / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ) (RU). – № 2022115104: заявл. 03.06.2022; опубл. 19.12.2022; Бюл. № 35. – 9 с.

68. Патент № 2795528 С1 Российская Федерация, МПК В61L 23/04, В61К 9/00. Устройство для автоматического контроля излома рельсов на электрифицированных железных дорогах / В. И. Шаманов, Д. В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ) (RU). – № 2023101830: заявл. 27.01.2023; опубл. 04.05.2023; Бюл. № 13. – 5 с.

69. Патент на полезную модель № 59010 U1 Российская Федерация, МПК В61L 25/06. Приемное устройство для автоматической локомотивной сигнализации / В.И. Шаманов, А.В. Пультяков, Ю.А. Трофимов; заявитель и правообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ГОУ ВПО Иргупс). – № 2006124216/22: заявл. 05.07.2006; опубл. 10.12.2006. – Бюл. № 34. – 16 с.

70. Патент на полезную модель № 94944 U1 Российская Федерация, МПК В61L 25/06. Локомотивный приемник сигналов автоматической локомотивной сигнализации для участков с электротягой переменного тока / В.И. Шаманов; заявитель и правообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» (МИИТ) (RU). – № 2009143604/22: заявл. 26.11.2009; опубл. 10.06.2010. – Бюл. № 16. – 13 с.

71. Поинтнер, Ф. Системы обнаружения поездов: краткий обзор / Ф. Поинтнер // Будущее систем обнаружения поездов. Материалы форума «Wheel Detection». Выпуск 01.2018. – С. 7-10.

72. Присухина, И.В. Имитационная модель электрического кодового сигнала в Российских системах интервального регулирования движения поездов на основе рельсовых цепей / И.В. Присухина, Д.В. Борисенко, С.А. Лунёв // Труды СПИИРАН. – 2019. Том 18. – № 5. – С. 1212-1238.

73. Пультяков, А. В. Устойчивость работы систем автоматической локомотивной сигнализации с несущей частотой 75 / А.В. Пультяков, М.Э. Скоробогатов // Транссиб: на острие реформ: материалы международной научно-практической конференции. Чита, 06–07 октября 2016 года / Иркутский государственный университет путей сообщений; Забайкальский институт железнодорожного транспорта. – Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский университет путей сообщения». – 2016. – С. 239-244.

74. Розенберг, Е.Н. Инновационные технологии управления движением поездов / Е.Н. Розенберг // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – № 10. – С. 2–4.

75. Сапожников, Вл.В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие / Вл.В. Сапожников, В.В. Сапожников, Д.В. Ефанов [и др.]; под ред. Вл.В. Сапожникова. – М.: ФГБУ ДПО «УМЦ ЖДТ», 2017. – 318 с.

76. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661104 Российская Федерация. Программа для расчёта помех от тягового тока в неоднородных рельсовых линиях: № 2021660044: заявл. 25.06.21: опубл. 06.07.21 / Д.В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)).

77. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661645 Российская Федерация. Программа для расчёта распределения тягового тока в рельсовых линиях, оборудованных рельсовыми цепями: № 2022660738: заявл. 03.06.2022: опубл. 23.06.2022 / Д.В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ).

78. Соболев, Ю.В. Исследование рельсовых линий промышленного транспорта как канала передачи сигналов / Ю.В. Соболев. – Харьков, 1983 – 20 с. Рукопись представлена Харьк. ин-том инж. ж.-д. тр-та. Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 7 июля 1983, № 2335-83.

79. Сороко, В.И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: Справочник: [В 4 кн.] / В.И. Сороко, Ж.В. Фотькина. Кн. 1. – 4-е изд. – М.: ООО «НПФ «ПЛАНЕТА», 2013. – 1060 с.

80. Сороко, В.И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: Справочник: [В 4 кн.] / В.И. Сороко, Ж.В. Фотькина. Кн. 3. – 4-е изд. – М.: ООО «НПФ «ПЛАНЕТА», 2013. – 1016 с.

81. Табунщиков, А.К. Сбои АЛСН. Проблемы и пути их решения / А.К. Табунщиков, Е.В. Горенбейн, Л.И. Стряпкин // Автоматика, связь, информатика. – 2015. – № 8. – С. 21-22.

82. Трофимов, Ю.А. Обеспечение электромагнитной совместимости рельсовых цепей и устройств автоматической локомотивной сигнализации с тяговой сетью переменного тока: специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Трофимов Юрий Анатольевич. – Иркутск, 2006. – 24 с.

83. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы её обеспечения в технике / Э. Хабигер. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.

84. Шаманов, В.И. Аналитические методы оценки электромагнитного излучения для аппаратуры в интервальном регулировании движения поездов / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы II международной научно-практической конференции, Москва, 25 мая 2023 года / Под редакцией Л.А. Баранова. – Москва: Российский университет транспорта, 2023. – С. 655-659. – DOI 10.30932/9785002182794-2023-655-659.

85. Шаманов, В.И. Асимметрия тяговых токов под катушками АЛС / В.И. Шаманов, Ю.А. Трофимов // Автоматика, связь, информатика. – 2008, – № 11, – С. 37-39.
86. Шаманов, В.И. Влияние сбоев в работе рельсовых цепей на безопасность движения поездов / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Безопасность движения поездов: труды XIX Всероссийской науч.-практ. конф.: в 2 ч. Ч. 2 – М.: РУТ (МИИТ), 2018. – С. 27-28.
87. Шаманов, В.И. Диагностика состояния электрической изоляции железобетонных шпал / В.И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 12. – С. 8-11.
88. Шаманов, В.И. Измерение электрических сопротивлений в неоднородных рельсовых линиях на участках с электротягой / В.И. Шаманов, А.Е. Ваньшин, Д.В. Денежкин, Л. Тасболатова // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 3. – С. 15-17. – DOI 10.34649/AT.2020.3.3.002.
89. Шаманов, В.И. Измерения параметров рельсовых линий в задачах электромагнитной совместимости / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Автоматика, связь, информатика. – 2022, – №8. – С. 10-16. – DOI 10.34649/AT.2022.8.8.003.
90. Шаманов, В.И. Измерения электрических сопротивлений в неоднородных тяговых рельсовых линиях / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IX Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1. – Гомель: БелГУТ, 2019. – С. 250-251.
91. Шаманов, В.И. Измерения, контроль и диагностика параметров рельсовых цепей / В.И. Шаманов, В.П. Суров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. – Иркутск: – 2009. – № 2 (22). – С. 143-147.
92. Шаманов, В.И. Компьютерное моделирование динамики переменного тягового тока в рельсах под катушками АЛСН / В.И. Шаманов, Ю.А. Трофимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. Иркутск: – 2008. – № 1 (17). – С. 55–60.

93. Шаманов, В.И. Контроль поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1. – Гомель: БелГУТ, 2020. – С. 52-54.

94. Шаманов, В.И. Косвенные измерения асимметрии тягового тока в рельсах под катушками автоматической локомотивной сигнализации / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XI Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1. – Гомель: БелГУТ, 2021. – С. 208-210.

95. Шаманов, В.И. Математическое моделирование взаимного влияния рельсовых трактов передачи через разделительные стыки / В.И. Шаманов // Деп. в ЦНИИТЭИ МПС. – М.: 1988. – №4297. – 19 с.

96. Шаманов, В.И. Методика расчёта эффективности технических мероприятий по повышению надёжности действующих устройств сигнализации, централизации и блокировки / В.И. Шаманов, Б.М. Ведерников. – М.: МПС, 1990. – 79 с.

97. Шаманов, В.И. Методы нормирования уровня помех от переменного тягового тока на приемники сигналов / В.И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 1. – С. 14–19. – DOI 10.34649/AT.2023.1.1.003.

98. Шаманов, В.И. Моделирование генерации помех токами рельсовой тяговой сети / В.И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 10. – С. 5-9.

99. Шаманов, В.И. Нормирование сопротивления элементов тяговой рельсовой сети / В.И. Шаманов, Н.Н. Балугев // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – №2. – С. 13-18.

100. Шаманов, В.И. Обеспечение надёжности токопроводящих элементов рельсовой линии при электротяге переменного тока / В.И. Шаманов, В.В. Косякин, Г.С. Березовский, А.В. Пулятьков // Автоматика, связь, информатика. – 2002. – № 12. – С. 28-32.

101. Шаманов, В.И. Параметры рельсовых линий в задачах электромагнитной совместимости / В.И. Шаманов, Ю.А. Трофимов // Современные технологии.

Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. Иркутск: – 2015. – № 4 (48). – С. 196-203.

102. Шаманов, В.И. Параметры тяговой рельсовой сети и устойчивость работы приборов безопасности / В.И. Шаманов, В.П. Суров, Ю.А. Трофимов, Ю.А.Алешечкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. – Иркутск: – 2008. – № 2 (18). – С. 140-145.

103. Шаманов, В.И. Помехи и помехоустойчивость автоматической локомотивной сигнализации / В.И. Шаманов. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2005. – 236 с.

104. Шаманов, В.И. Помехи на аппаратуру рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Средства защиты: учебное пособие. / В.И. Шаманов. – М.: УМЦ ЖДТ, 2019. – 303 с.

105. Шаманов, В.И. Проблемы электромагнитной совместимости рельсовых цепей с тяговой сетью / В.И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2019. Т. 5. – №2. – С. 160-185. – DOI 10.20295/2412-9186-2019-5-2-160-185.

106. Шаманов, В.И. Пути повышения устойчивости работы рельсовых цепей / В.И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 2. – С. 20-25.

107. Шаманов, В.И. Расчётные электрические схемы рельсовых линий / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XII Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1. – Гомель: БелГУТ, 2022. – С. 230-232.

108. Шаманов, В.И. Расчёты помех от тягового тока в неоднородных рельсовых линиях / В.И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2020. Том 6. – № 3. – С. 241–267. – DOI 10.20295/2412-9186-2020-6-3-241-267.

109. Шаманов, В.И. Решения некоторых вопросов обеспечения безопасности интервального регулирования движения поездов / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2021: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2021. – С. 144-147.

110. Шаманов, В.И. Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами / В.И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2018. Том 4. – № 2. – С. 223-240.

111. Шаманов, В.И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В.И. Шаманов. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 244 с.

112. Штолл, К. Влияние тягового подвижного состава с тиристорным регулированием на устройства СЦБ и связи / К. Штолл, И. Бечка, Б. Надворник. – М.: Транспорт, 1989. – 199 с.

113. Шур, Е.А. Причины изломов рельсов / Е.А. Шур, А.И. Борц, К.Л. Заграничек, С.А. Васильева // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 5. – С. 9-14.

114. Щербина, А.Е. Способ повышения устойчивости функционирования рельсовых цепей тональной частоты: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Щербина Алексей Евгеньевич. – Москва, 2011. – 24 с.

115. Щербина, Е.Г. Рельсовые цепи - состояние и перспективы / Е.Г. Щербина // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 2. – С. 18-19.

116. Юсупов, Р.Р. Марковская модель переключений контроллера машиниста / Р.Р. Юсупов, В.Б. Леушин, Н.А. Кравцова // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – № 4 (28). – С. 28-36.

117. Bestem'yanov, P.F. A method of statistical modeling of electromagnetic interference in automatics and telemechanics channels in railway transport / P.F. Bestem'yanov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – No. 9. – P. 503-508. – DOI 10.3103/S1068371215090035.

118. Bestem'yanov, P.F. Detecting Malfunctions in the Measuring Circuits of Railway Automation and Remote-Control Systems for the Safety of Train Traffic / P.F. Bestem'yanov // Russian Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 93. – No. 9. – P. 605-609. – DOI 10.3103/S1068371222090048.

119. Bestem'yanov, P.F. On statistical models of the amplitude and the duration of pulsed electromagnetic interference in automatic-control and telemechanics channels of

subway lines / P.F. Bestem'yanov, I.G. Gorlin // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87. – No. 9. – P. 493-497. © Allerton Press, Inc., 2016. – DOI 10.3103/S1068371216090042.

120. Bestem'yanov, P.F. Study of the electromagnetic environment in electrified railroad section / P.F. Bestem'yanov, Y.A. Kravtsov, V.I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90. – No. 9. – P. 615-619. – DOI 10.3103/S1068371219090049.

121. Büssmann, F. Wirtschaftlichkeit eines satellitenge stützten ERTMS für deutsche Regionalstrecken / F. Büssmann, B. Scheier, F. Brinkmann, B. Jäder // Signal und Draht. – 2016. – B. 108. – № 10. – S. 6-11.

122. Erste signalfreie Fernverkehrsstrecke // Signal und Draht. – 2016. – B. 108. – № 2. – S. 68.

123. Kurzweil, F. Diebstahlsichre Verbinder bei Gleisstromkreisen / F. Kurzweil // Signal und Draht. – 2014. – B. 106. – № 3. – S. 29-32.

124. Railway Operation and Control. 3rd edition. Washington: VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace. – 2014. – 284 p.

125. Rosenbergen, M. Hochverfügbarkeit: Definition, Einflussfaktoren und Lösungen / M. Rosenbergen, F. Pointer // Signal und Draht. – 2015. – B. 107. – № 6. – S. 6-8.

126. Sauer, C. Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtding / C. Sauer // Eisenbahningenieur. – 2014. – B. 65. – № 7. – S. 25-30.

127. Shamanov, V. Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control / V. Shamanov // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2018), Kazan, Russia, September 14–17, – 2018. – P. 140-146.

128. Shamanov, V.I. Principles of Normalization of the Level of Interference from the Traction Current in the Operation of Automatics and Remote-Controlled Receivers / V.I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 92. – No. 9. – P. 520-523. – DOI 10.3103/S1068371221090108.

129. Shamanov, V.I. Alternating Traction Current Dynamics in Track Lines on Double-Track Hauls / V.I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 90. – No. 10. – P. 566-571. © Allerton Press, Inc., 2016. – DOI 10.3103/S1068371216100060.

130. Shamanov, V.I. Automatic Control over Rail Breakage in Sections with AC Electric Traction. ISSN 1068-3712 / V.I. Shamanov, D.V. Denezhkin // Russian Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 93. No. 9. – P. 596-599. © Allerton Press, Inc., 2022. Russian Text © The Author(s), 2022, published in Elektrotehnika. – 2022. – No. 9. – P. 47-50. – DOI 10.3103/S1068371222090115.

131. Shamanov, V.I. Influence of traction currents on stability of work equipment of railway automation / V.I. Shamanov // Sciences of Europe. – 2019. – Vol. 1. – No. 37. – P. 53-59.

132. Shamanov, V. Rail break monitoring in areas with AC electric traction / V. Shamanov, D. Denezhkin // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2476 (1): 020077. – DOI 10.1063/5.0102973.

133. Shamanov, V.I. The magnetic properties of rail lines and the level of interferences for the apparatus of automatic control and telemechanics / V.I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – No. 9. – P. 509-512. – DOI 10.3103/S1068371215090102.

134. Shamanov, V.I. The process of traction-current asymmetry generation in rail lines / V.I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85. – No. 8. – P. 509-512. (USA). – DOI 10.3103/S1068371214080124.

135. Vantuono, W. Train control systems in the United States / W. Vantuono // International Railway Journal. – 2009. – № 10. – P. 32-34, 36.

136. Watanabe, I. Moving Bloc System with Continuous Train Detection Utilizing Train Shutting Impedance of Track Circuit / I. Watanabe, T. Takashige // Quarterly Reports of RTRI. – 1989. – № 4. – P. 9-11.

Приложение А

Акт внедрения результатов диссертационного исследования

**Акционерное общество
«Научно-исследовательский и проектно-конструкторский
институт информатизации, автоматизации и связи
на железнодорожном транспорте»**

**АКТ
ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

АО «НИИАС» является головной организацией по разработке и внедрению систем интервального регулирования и управления движением поездов как на путях общего пользования, так и на участках с высокоскоростным движением с обеспечением требований безопасности движения поездов.

Тональные рельсовые цепи являются наиболее перспективным видом рельсовых цепей. Вдоль перегона с бесстыковыми цельносварными рельсовыми плетями, оборудованных тональными рельсовыми цепями устанавливаются уравнивающие дроссели для уменьшения уровня помех от тягового тока, но методики оценки эффективности данных дросселей и определения точек их установки в настоящее время нет.

По результатам исследований Денежкина Дмитрия Валерьевича в его диссертационной работе на тему «Повышение помехоустойчивости аппаратуры рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации при электротяге переменного тока» найдены критерии эффективности использования этих дросселей.

Эти результаты диссертации применены институтом при разработке и анализе рельсовых цепей в проектах оборудования в части мест установки уравнивающих дросселей для обеспечения надежности и безопасности их работы, а так же при анализе работ других проектных организаций по данной тематике.

Первый заместитель
генерального директора АО «НИИАС»,
доктор технических наук, профессор



Б.Н. Розенберг

28.08.2023

Приложение Б

Таблица Б.1 – Предельно допускаемые длины отрезков рельсовых линий
с рельсами типа Р65 для магистральных железных дорог
при замещении их трёхполюсниками

Частоты переменного тока, Гц											
25	50	100	150	300	450	480	550	600	720	750	780
Удельные расчётные сопротивления рельсов типа Р65 z_{PH} , Ом/км											
0,25 e^{j52°	0,40 e^{j65°	0,65 e^{j69°	0,89 e^{j71°	1,75 $e^{j76,2^\circ}$	2,58 $e^{j79,5^\circ}$	2,70 e^{j80°	2,98 e^{j80°	3,19 $e^{j80,5^\circ}$	3,70 $e^{j80,5^\circ}$	3,82 $e^{j80,5^\circ}$	3,95 e^{j81°
Удельные магнитные сопротивления рельсовых нитей z_M , Ом/км											
0,24 e^{j90°	0,45 e^{j90°	0,86 e^{j90°	1,25 e^{j90°	2,3 e^{j90°	3,4 e^{j90°	3,6 e^{j90°	4,1 e^{j90°	4,5 e^{j90°	5,3 e^{j90°	5,5 e^{j90°	5,7 e^{j90°
Удельные продольные сопротивления рельсовых нитей $z_{ПР} = z_M + z_{PH}$, Ом/км											
0,46 $e^{j70,6^\circ}$	0,83 $e^{j78,2^\circ}$	1,49 e^{j81°	2,11 e^{j82°	4,02 e^{j84°	5,96 $e^{j85,5^\circ}$	6,28 $e^{j85,7^\circ}$	7,05 $e^{j85,8^\circ}$	7,66 $e^{j86,1^\circ}$	8,97 $e^{j86,1^\circ}$	9,29 $e^{j86,1^\circ}$	9,62 $e^{j86,3^\circ}$
Предельно допускаемые длины трёхполюсников при удельном поперечном сопротивлении рельсов 0,5 Ом·км и погрешности моделирования 5%, км.											
0,60	0,33	0,18	0,13	0,068	0,046	0,044	0,039	0,036	0,031	0,029	0,028
Предельно допускаемые длины трёхполюсников при удельном поперечном сопротивлении рельсов 1,5 Ом·км и погрешности моделирования 5%, км.											
1,79	1,00	0,55	0,39	0,20	0,138	0,131	0,117	0,107	0,092	0,088	0,085
Предельно допускаемые длины трёхполюсников при удельном поперечном сопротивлении рельсов 18,0 Ом·км и погрешности моделирования 5%, км.											
21,4	12,0	6,6	4,7	2,5	1,65	1,57	1,40	1,29	1,10	1,06	1,02
Предельно допускаемые длины трёхполюсников при удельном поперечном сопротивлении рельсов 0,5 Ом·км и погрешности моделирования 1%, км.											
0,27	0,15	0,082	0,058	0,030	0,021	0,020	0,017	0,016	0,014	0,013	0,012
Предельно допускаемые длины трёхполюсников при удельном поперечном сопротивлении рельсов 1,5 Ом·км и погрешности моделирования 1%, км.											
0,80	0,45	0,25	0,17	0,091	0,062	0,059	0,052	0,048	0,041	0,040	0,038
Предельно допускаемые длины трёхполюсников при удельном поперечном сопротивлении рельсов 18,0 Ом·км и погрешности моделирования 1%, км.											
9,6	5,3	3,0	2,1	1,10	0,74	0,70	0,63	0,58	0,49	0,47	0,46

Приложение В

Листинг программы расчёта в среде Mathcad 15

$$\begin{aligned}
 I_{0л} &:= 5 & I_{11b} &:= 5 & I_{12b} &:= 5 & I_{y1b} &:= 5 & I_{21b} &:= 5 & I_{22b} &:= 5 & I_{y2b} &:= 5 \\
 I_{3п} &:= 5 & I_{11a} &:= 5 & I_{12a} &:= 5 & I_{y1a} &:= 5 & I_{21a} &:= 5 & I_{22a} &:= 5 & I_{y2a} &:= 5 \\
 j &:= \sqrt{-1} & R_{0л} &:= 0.5 & Z_{дп1} &:= 0.05 & z_{пн1} &:= 0.45 \cdot e^{j \cdot 53^\circ} \\
 I_T &:= 300 & R_{3п} &:= 1.0 & Z_{дп2} &:= 0.05 & z_{пн2} &:= 0.45 \cdot e^{j \cdot 53^\circ} \\
 f &:= 50 & Z_{дт} &:= j \cdot 0.25 & M_{12} &:= 1.44 \cdot 10^{-3} & r_{п3} &:= 1.5 & r_0 &:= 5 & \underline{1} &:= 1 \\
 Z_{11}(l) &:= 0.5 \cdot z_{пн1} \cdot l & Z_{12}(l) &:= 0.5 \cdot z_{пн2} \cdot l \\
 Z_{21}(l) &:= 0.5 \cdot z_{пн1} \cdot l & Z_{22}(l) &:= 0.5 \cdot z_{пн2} \cdot l \\
 Z_{M11}(l) &:= 0.5 \cdot j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{12} \cdot l & Z_{M12}(l) &:= 0.5 \cdot j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{12} \cdot l \\
 Z_{M21}(l) &:= 0.5 \cdot j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{12} \cdot l & Z_{M22}(l) &:= 0.5 \cdot j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{12} \cdot l \\
 R_{п32}(l) &:= \frac{r_{п3}}{l} & R_0(l) &:= \frac{r_0}{l} & R_{п31}(l) &:= \frac{(R_{п32}(l) \cdot R_0(l))}{(R_{п32}(l) + R_0(l))}
 \end{aligned}$$

Given

$$\begin{aligned}
 I_{11a} \cdot (Z_{11}(l) + Z_{M11}(l) + Z_{дп1} + Z_{дт}) + I_{0л} \cdot R_{0л} - I_{3п} \cdot R_{3п} - I_{y1a} \cdot R_{п31}(l) &= 0 \\
 I_{12a} \cdot (Z_{12}(l) + Z_{M12}(l) + Z_{дп2} + Z_{дт}) + I_{0л} \cdot R_{0л} - I_{3п} \cdot R_{3п} - I_{y2a} \cdot R_{п32}(l) &= 0 \\
 I_{11b} \cdot (Z_{11}(l) + Z_{M11}(l)) + I_{21a} \cdot (Z_{21}(l) + Z_{M21}(l)) + I_{y1a} \cdot R_{п31}(l) - I_{y1b} \cdot R_{п31}(l) &= 0 \\
 I_{12b} \cdot (Z_{12}(l) + Z_{M12}(l)) + I_{22a} \cdot (Z_{22}(l) + Z_{M22}(l)) + I_{y2a} \cdot R_{п32}(l) - I_{y2b} \cdot R_{п32}(l) &= 0 \\
 I_{21b} \cdot (Z_{21}(l) + Z_{M21}(l)) + I_{y1b} \cdot R_{п31}(l) - I_{y2b} \cdot R_{п32}(l) - I_{22b} \cdot (Z_{22}(l) + Z_{M22}(l)) &= 0 \\
 I_T &= I_{0л} + I_{3п} & I_{y1b} &= I_{21b} - I_{11b} \\
 I_T &= I_{21b} + I_{22b} & I_{y2b} &= I_{22b} - I_{12b} \\
 I_{0л} &= I_{11a} + I_{12a} & I_{11b} &= I_{21a} \\
 I_{y1a} &= I_{21a} - I_{11a} & I_{12b} &= I_{22a} \\
 I_{y2a} &= I_{22a} - I_{12a}
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} I_{0Л} \\ I_{3П} \\ I_{11a} \\ I_{21a} \\ I_{y1a} \\ I_{12a} \\ I_{22a} \\ I_{y2a} \\ I_{11b} \\ I_{21b} \\ I_{y1b} \\ I_{12b} \\ I_{22b} \\ I_{y2b} \end{pmatrix} := \text{Find}(I_{0Л}, I_{3П}, I_{11a}, I_{21a}, I_{y1a}, I_{12a}, I_{22a}, I_{y2a}, I_{11b}, I_{21b}, I_{y1b}, I_{12b}, I_{22b}, I_{y2b})$$

$$k_{M1a} := \frac{I_{12a}}{I_{11a}} \quad |k_{M1a}| = 1.038$$

$$k_{M2a} := \frac{I_{22a}}{I_{21a}} \quad |k_{M2a}| = 1.014$$

$$k_{M1b} := \frac{I_{12b}}{I_{11b}} \quad |k_{M1b}| = 1.014$$

$$k_{M2b} := \frac{I_{22b}}{I_{21b}} \quad |k_{M2b}| = 0.932$$

$$\text{Module} := \begin{pmatrix} |I_{0\Pi}| \\ |I_{3\Pi}| \\ |I_{11a}| \\ |I_{21a}| \\ |I_{y1a}| \\ |I_{12a}| \\ |I_{22a}| \\ |I_{y2a}| \\ |I_{11b}| \\ |I_{21b}| \\ |I_{y1b}| \\ |I_{12b}| \\ |I_{22b}| \\ |I_{y2b}| \end{pmatrix} \quad \text{Argument} := \frac{180}{\pi} \cdot \arg \begin{pmatrix} I_{0\Pi} \\ I_{3\Pi} \\ I_{11a} \\ I_{21a} \\ I_{y1a} \\ I_{12a} \\ I_{22a} \\ I_{y2a} \\ I_{11b} \\ I_{21b} \\ I_{y1b} \\ I_{12b} \\ I_{22b} \\ I_{y2b} \end{pmatrix}$$

Module =

	0
0	190.261
1	126.320
2	93.376
3	105.260
4	18.057
5	96.888
6	106.683
7	13.391
8	105.260
9	155.326
10	71.826
11	106.683
12	144.694
13	57.203

Argument =

	0
0	-15.0
1	23.0
2	-14.7
3	-22.6
4	-67.6
5	-15.3
6	-20.5
7	-61.0
8	-22.6
9	0.6
10	36.0
11	-20.5
12	-0.7
13	38.5

Given

$$I11a \cdot (Z_{11}(l) + k_{M1a} \cdot Z_{M11}(l) + Z_{дП1} + Z_{дТ}) + I_{0Л} \cdot R_{0Л} - I_{3П} \cdot R_{3П} - I_{y1a} \cdot R_{p31}(l) = 0$$

$$I12a \cdot (Z_{12}(l) + k_{M1a}^{-1} \cdot Z_{M12}(l) + Z_{дП2} + Z_{дТ}) + I_{0Л} \cdot R_{0Л} - I_{3П} \cdot R_{3П} - I_{y2a} \cdot R_{p32}(l) = 0$$

$$I11b \cdot (Z_{11}(l) + k_{M1b} \cdot Z_{M11}(l)) + I21a \cdot (Z_{21}(l) + k_{M2a} \cdot Z_{M21}(l)) + I_{y1a} \cdot R_{p31}(l) - I_{y1b} \cdot R_{p31}(l) = 0$$

$$I12b \cdot (Z_{12}(l) + k_{M1b}^{-1} \cdot Z_{M12}(l)) + I22a \cdot (Z_{22}(l) + k_{M2a}^{-1} \cdot Z_{M22}(l)) + I_{y2a} \cdot R_{p32}(l) - I_{y2b} \cdot R_{p32}(l) = 0$$

$$I21b \cdot (Z_{21}(l) + k_{M2b} \cdot Z_{M21}(l)) + I_{y1b} \cdot R_{p31}(l) - I_{y2b} \cdot R_{p32}(l) - I22b \cdot (Z_{22}(l) + k_{M2b}^{-1} \cdot Z_{M22}(l)) = 0$$

$$I_T = I_{0Л} + I_{3П}$$

$$I_{y1b} = I21b - I11b$$

$$I_T = I21b + I22b$$

$$I_{y2b} = I22b - I12b$$

$$I_{0Л} = I11a + I12a$$

$$I11b = I21a$$

$$I_{y1a} = I21a - I11a$$

$$I12b = I22a$$

$$I_{y2a} = I22a - I12a$$

$$\begin{pmatrix} I_{0Л} \\ I_{3П} \\ I11a \\ I12a \\ I21a \\ I_{y1a} \\ I12a \\ I22a \\ I_{y2a} \\ I11b \\ I21b \\ I_{y1b} \\ I12b \\ I22b \\ I_{y2b} \end{pmatrix}$$

$$:= \text{Find}(I_{0Л}, I_{3П}, I11a, I21a, I_{y1a}, I12a, I22a, I_{y2a}, I11b, I21b, I_{y1b}, I12b, I22b, I_{y2b})$$

$$\text{Module1} := \begin{pmatrix} |I_{0\pi}| \\ |I_{3\pi}| \\ |I_{11a}| \\ |I_{21a}| \\ |I_{y1a}| \\ |I_{12a}| \\ |I_{22a}| \\ |I_{y2a}| \\ |I_{11b}| \\ |I_{21b}| \\ |I_{y1b}| \\ |I_{12b}| \\ |I_{22b}| \\ |I_{y2b}| \end{pmatrix} \quad \text{Argument1} := \frac{180}{\pi} \cdot \arg \begin{pmatrix} I_{0\pi} \\ I_{3\pi} \\ I_{11a} \\ I_{21a} \\ I_{y1a} \\ I_{12a} \\ I_{22a} \\ I_{y2a} \\ I_{11b} \\ I_{21b} \\ I_{y1b} \\ I_{12b} \\ I_{22b} \\ I_{y2b} \end{pmatrix}$$

	0
0	190.229
1	126.399
2	93.404
3	105.857
4	18.022
5	96.825
6	106.179
7	13.513
8	105.857
9	155.641
10	72.661
11	106.179
12	144.422
13	56.431

	0
0	-15.1
1	23.0
2	-15.2
3	-22.7
4	-65.3
5	-15.0
6	-20.5
7	-64.0
8	-22.7
9	1.1
10	37.1
11	-20.5
12	-1.2
13	37.2

Приложение Г

Результаты расчёта асимметрии тягового тока и их проверка

Исходные данные:

- тяговый ток частотой $f = 50$ Гц величиной $\dot{I}_T = 300$ А;
- температура рельсов $+ 20^\circ\text{C}$;
- удельное сопротивление рельсовых нитей при тяговом токе в рельсовой линии 300 А $z_{PH} = 0,45 e^{j53^\circ}$ Ом/км;
- взаимная индуктивность рельсовых нитей на частоте 50 Гц $M_{12} = 1,44$ мГн/км;
- удельное сопротивление изоляции рельсов по отношению к земле $r_{P3} = 1,5$ Ом·км;
- удельное сопротивление изоляции цепей заземления контактных опор на рельс $r_0 = 5$ Ом·км;

Таблица Г.1 – Результаты расчёта после первой итерации

\dot{I}_{TK}, A	\dot{I}_{OL}, A	$\dot{I}_{3П}, \text{A}$	\dot{I}_{11}^A, A		\dot{I}_{21}^A, A		\dot{I}_{21}^B, A	\dot{I}_{TH}, A
300	190,3 $e^{-j15,0^\circ}$	126,3 $e^{j23,0^\circ}$	93,4 $e^{-j14,7^\circ}$		105,3 $e^{-j22,6^\circ}$		155,3 $e^{j0,6^\circ}$	300
				\dot{I}_{Y1}^A, A		\dot{I}_{Y1}^B, A		
				18,1 $e^{-j67,6^\circ}$		71,8 $e^{j36,0^\circ}$		
				13,4 $e^{-j61,0^\circ}$		57,2 $e^{j38,5^\circ}$		
				\dot{I}_{Y2}^A, A		\dot{I}_{Y2}^B, A		
			96,9 $e^{-j15,3^\circ}$		106,7 $e^{-j20,5^\circ}$		144,7 $e^{-j0,6^\circ}$	
			\dot{I}_{12}^A, A		\dot{I}_{22}^A, A		\dot{I}_{22}^B, A	
			k_{M1}^A		k_{M2}^A		k_{M2}^B	
			1,038		1,014		0,932	
			k_{A1}		k_{A2}		k_{A3}	
			0,0184		0,066		0,0354	

Сумма токов отсасывающей линии и заземляющей подстанции равна 300 А:

$$\dot{I}_{\text{ОЛ}} + \dot{I}_{\text{ЗП}} = 190,3 e^{-j15,0^\circ} + 126,3 e^{j23,0^\circ} = (183,8 - j49,3) + (116,2 + j49,3) = 300 \text{ А.}$$

Сумма токов в первой и второй рельсовых нитях под приёмными локомотивными катушками АЛС также равна 300 А:

$$\dot{I}_{21}^B + \dot{I}_{22}^B = 155,3 e^{j0,6^\circ} + 144,7 e^{-j0,6^\circ} = (155,3 + j1,6) + (144,7 - j1,6) = 300 \text{ А.}$$

Ток через отсасывающую линию:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{ОЛ}} = \dot{I}_{11}^A + \dot{I}_{12}^A &= 93,4 e^{-j14,7^\circ} + 96,9 e^{-j15,3^\circ} = (90,3 - j23,7) + (93,5 - j25,6) = \\ &= 183,8 - j49,3 = 190,3 e^{-j15,0^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

Ток через заземляющую подстанцию, выраженный через токи утечки:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{ЗП}} = \dot{I}_{\text{Y1}}^A + \dot{I}_{\text{Y2}}^A + \dot{I}_{\text{Y1}}^B + \dot{I}_{\text{Y2}}^B &= 18,1 e^{-j67,6^\circ} + 13,4 e^{-j61,0^\circ} + 71,8 e^{j36,0^\circ} + 57,2 e^{j38,5^\circ} = \\ &= (6,9 - j16,7) + (6,5 - j11,7) + (58,1 + j42,2) + (44,8 + j35,6) = \\ &= 116,3 + j49,4 = 126,4 e^{j23,0^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

Токи утечки, выраженные через токи в рельсовых нитях:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{Y1}}^A = \dot{I}_{21}^A - \dot{I}_{11}^A &= 105,3 e^{-j22,6^\circ} - 93,4 e^{-j14,7^\circ} = (97,2 - j40,5) - (90,3 - j23,7) = \\ &= 6,9 - j16,8 = 18,1 e^{-j67,7^\circ} \text{ А;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{Y2}}^A = \dot{I}_{22}^A - \dot{I}_{12}^A &= 106,7 e^{-j20,5^\circ} - 96,9 e^{-j15,3^\circ} = (99,9 - j37,4) - (93,5 - j25,6) = \\ &= 6,4 - j11,8 = 13,4 e^{-j61,5^\circ} \text{ А;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Y1}^B &= \dot{I}_{21}^B - \dot{I}_{11}^B = 155,3 e^{j0,6^\circ} - 105,3 e^{-j22,6^\circ} = (155,3 + j1,6) - (97,2 - j40,5) = \\ &= 58,1 + j42,1 = 71,8 e^{j35,9^\circ} \text{ A}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Y2}^B &= \dot{I}_{22}^B - \dot{I}_{12}^B = 144,7 e^{-j0,6^\circ} - 106,7 e^{-j20,5^\circ} = (144,7 - j1,6) - (99,9 - j37,4) = \\ &= 44,8 + j35,8 = 57,3 e^{j38,6^\circ} \text{ A}. \end{aligned}$$

Таблица Г.2 – Итоговые результаты расчёта

\dot{I}_{TK}, A	$\dot{I}_{OЛ}, \text{A}$	$\dot{I}_{ЗП}, \text{A}$	\dot{I}_{11}^A, A		\dot{I}_{21}^A, A		\dot{I}_{21}^B, A	\dot{I}_{TH}, A
300	190,2	126,4	93,4		105,9		155,6	300
	$e^{-j15,1^\circ}$	$e^{j23,0^\circ}$	$e^{-j15,2^\circ}$		$e^{-j22,7^\circ}$		$e^{j1,1^\circ}$	
				\dot{I}_{Y1}^A, A		\dot{I}_{Y1}^B, A		
				18,0		72,7		
				$e^{-j65,3^\circ}$		$e^{j37,1^\circ}$		
				13,5		56,4		
				$e^{-j64,0^\circ}$		$e^{j37,2^\circ}$		
				\dot{I}_{Y2}^A, A		\dot{I}_{Y2}^B, A		
			96,8		106,2		144,4	
			$e^{-j15,0^\circ}$		$e^{-j20,5^\circ}$		$e^{-j1,2^\circ}$	
			\dot{I}_{12}^A, A		\dot{I}_{22}^A, A		\dot{I}_{22}^B, A	
			$k_{\Delta 1}$		$k_{\Delta 2}$		$k_{\Delta 3}$	
			0,0179		0,0014		0,0373	

Сумма токов отсасывающей линии и заземляющей подстанции равна 300 А:

$$\dot{I}_{OЛ} + \dot{I}_{ЗП} = 190,2 e^{-j15,1^\circ} + 126,4 e^{j23,0^\circ} = (183,6 - j49,5) + (116,4 + j49,4) = 300 \text{ A}.$$

Сумма токов в первой и второй рельсовых нитях катушками АЛС также равна 300 А:

$$\dot{I}_{21}^B + \dot{I}_{22}^B = 155,6 e^{j1,1^\circ} + 144,4 e^{-j1,2^\circ} = (155,6 + j3,0) + (144,4 - j3,0) = 300 \text{ A}.$$

Ток через отсасывающую линию:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{ОЛ}} &= \dot{I}_{11}^A + \dot{I}_{12}^A = 93,4 e^{-j15,2^\circ} + 96,8 e^{-j15,0^\circ} = (90,1 - j24,5) + (93,5 - j25,0) = \\ &= 183,6 - j49,5 = 190,2 e^{-j15,1^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

Ток через заземляющую подстанцию, выраженный через токи утечки:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{ЗП}} &= \dot{I}_{\text{Y1}}^A + \dot{I}_{\text{Y2}}^A + \dot{I}_{\text{Y1}}^B + \dot{I}_{\text{Y2}}^B = 18,0 e^{-j65,3^\circ} + 13,5 e^{-j64,0^\circ} + 72,7 e^{j37,1^\circ} + 56,4 e^{j37,2^\circ} = \\ &= (7,5 - j16,4) + (5,9 - j12,1) + (58,0 + j43,8) + (44,9 + j34,1) = \\ &= 116,3 + j49,4 = 126,4 e^{j23,0^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

Токи утечки, выраженные через токи в рельсовых нитях:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{Y1}}^A &= \dot{I}_{21}^A - \dot{I}_{11}^A = 105,9 e^{-j22,7^\circ} - 93,4 e^{-j15,2^\circ} = (97,7 - j40,9) - (90,1 - j24,5) = \\ &= 7,6 - j16,4 = 18,1 e^{-j65,1^\circ} \text{ А;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{Y2}}^A &= \dot{I}_{22}^A - \dot{I}_{12}^A = 106,2 e^{-j20,5^\circ} - 96,8 e^{-j15,0^\circ} = (99,5 - j37,2) - (93,5 - j25,0) = \\ &= 6,0 - j12,2 = 13,6 e^{-j63,9^\circ} \text{ А;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{Y1}}^B &= \dot{I}_{21}^B - \dot{I}_{11}^B = 155,6 e^{j1,1^\circ} - 105,9 e^{-j22,7^\circ} = (155,6 + j3,0) - (97,7 - j40,9) = \\ &= 57,9 + j43,9 = 72,7 e^{j37,2^\circ} \text{ А;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{Y2}}^B &= \dot{I}_{22}^B - \dot{I}_{12}^B = 144,4 e^{-j1,2^\circ} - 106,2 e^{-j20,5^\circ} = (144,4 - j3,0) - (99,5 - j37,2) = \\ &= 44,9 + j34,2 = 56,4 e^{j37,3^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

Приложение Д

Проверка с использованием Multisim 13

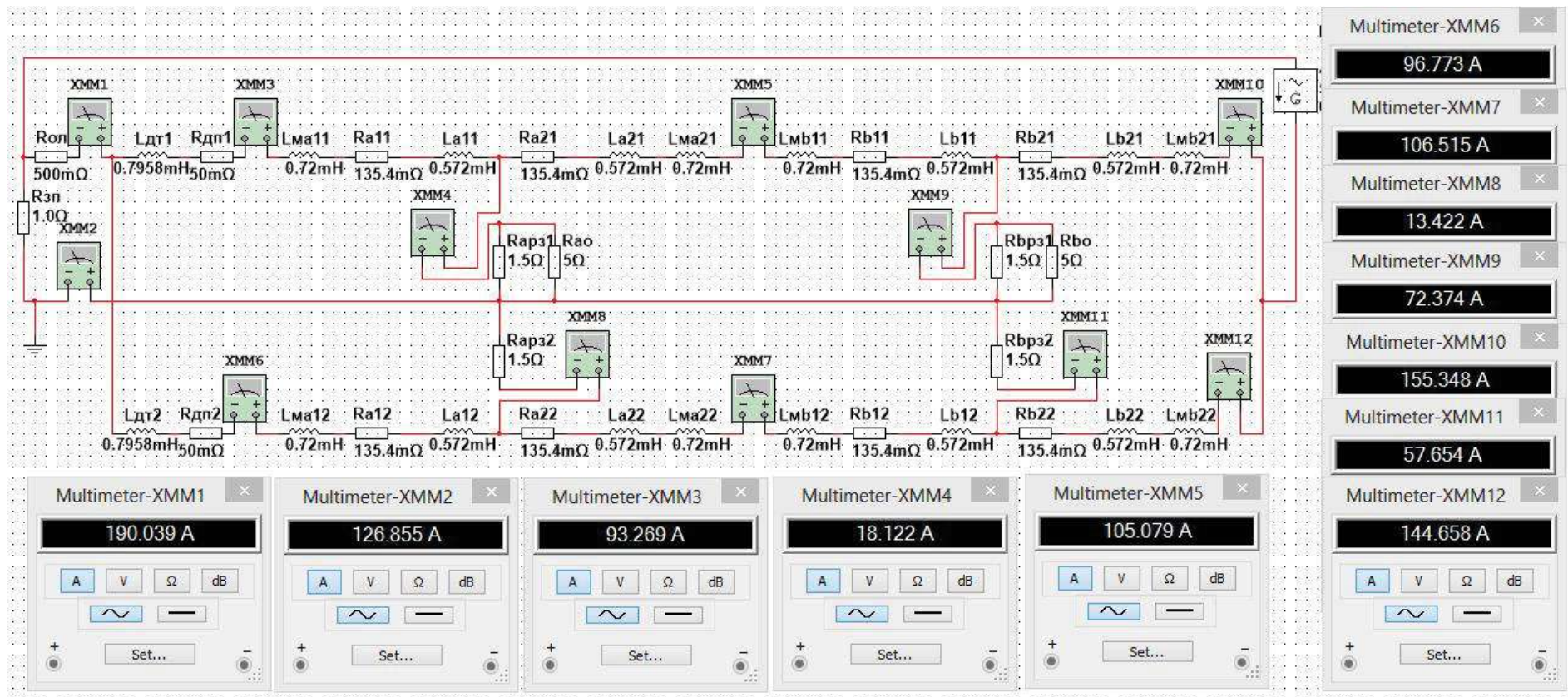


Рисунок Д.1 – Модель рельсовой линии и результаты моделирования процесса растекания тягового тока

Приложение Е

Асимметрия переменного тягового тока в рельсовой линии при отсутствии на ней подвижных единиц

Рельсовая цепь длиной 1,5 км ограничена изолирующими стыками с ДТ. Тяговый ток на входном для него конце рельсовой линии равен 300 А. Асимметрия тягового тока зависит от состояния элементов рельсовых нитей рельсовой линии по всей её длине. Релейный конец рельсовой цепи может находиться как на входном для тягового тока конце, так и на другом конце. Поэтому асимметрия тягового тока интересна на обоих концах рельсовой цепи.

Результаты расчётов величины асимметрии тягового тока в местах подключения к рельсовой линии аппаратуры РЦ выполнены для тех же условий, при которых получены рисунки 3.7 – 3.16 и 3.23 – 3.24. В таблице Е.1 приведены результаты расчётов только для первой гармоники тягового тока, а в таблице Е.2 – для его третьей гармоники.

За отрицательное значение принята величина асимметрии тягового тока для случаев, когда ток в рельсовой нити, к которой подключены заземлители, меньше, чем в другой рельсовой нити.

Если рельсовая линия обладает только поперечной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей, то на входном конце РЦ коэффициент асимметрии имеет положительную полярность. В конце рельсовой линии величина коэффициента асимметрии в рельсовых нитях меньше, чем в её начале. В результате при малых значениях поперечных сопротивлений рельсовых нитей значение коэффициента асимметрии тягового тока на выходном конце РЦ может быть отрицательным.

При наличии только продольной асимметрии тяговый ток в начале рельсовой линии преобладает в рельсовой нити с меньшим продольным сопротивлением. К концу рельсовой линии коэффициента асимметрии тягового тока увеличивается.

Таблица Е.1 – Асимметрия первой гармоники тягового тока в местах подключения аппаратуры РЦ

№ п/п	Температура, °С	Сопротивления рельсовых нитей						Асимметрия тягового тока			
		Удельные сопротивления				Коэффициенты асимметрии		В начале рельсовой линии		В конце рельсовой линии	
		Продольные $\times e^{-j65^\circ}$, Ом/км		Поперечные, Ом·км		$k_{AZ}^{ПР}$	$k_{AZ}^{ПП}$	Абсолютная величина, А	Относительная величина	Абсолютная величина, А	Относительная величина
		z_{PH1}	z_{PH2}	r_{P31}	r_{P32}						
1	+20	0,400	0,400	0,45	0,50	0	0,0588	8,9	0,0296	-2,0	-0,0170
	+20	0,400	0,400	16,0	18,0	0	0,0588	1,3	0,0044	0,7	0,0025
	-40	0,289	0,289	16,0	18,0	0	0,0588	1,2	0,0041	0,8	0,0026
2	+20	0,380	0,425	0,50	0,50	0,0588	0	7,7	0,0256	7,2	0,0584
	+20	0,380	0,425	18,0	18,0	0,0588	0	13,4	0,0446	13,5	0,0459
	-40	0,275	0,307	18,0	18,0	0,0588	0	11,4	0,0381	11,5	0,0391
3	+20	0,380	0,425	0,45	0,50	0,0588	0,0588	16,5	0,0550	5,0	0,0425
	+20	0,380	0,425	16,0	18,0	0,0588	0,0588	14,6	0,0488	14,2	0,0484
	-40	0,275	0,307	16,0	18,0	0,0588	0,0588	12,6	0,0421	12,3	0,0417
4	+20	0,425	0,380	0,45	0,50	0,0588	0,0588	1,2	0,0041	-9,0	-0,0765
	+20	0,425	0,380	16,0	18,0	0,0588	0,0588	-12,0	-0,0400	-12,7	-0,0434
	-40	0,307	0,275	16,0	18,0	0,0588	0,0588	-10,2	-0,0339	-10,7	-0,0364
5	-10	0,345	0,345	3,9	18,0	0	0,6429	32,1	0,1070	16,6	0,0585
	-10	0,327	0,366	3,9	18,0	0,0588	0,6429	43,6	0,1452	28,4	0,1002
	-10	0,366	0,327	3,9	18,0	0,0588	0,6429	20,6	0,0687	4,8	0,0168
6	+20	Неоднородная рельсовая линия			0,50	Неоднородная рельсовая линия		13,2	0,0440	-6,8	-0,0611
	+20				1,50			9,2	0,0306	-3,9	-0,0182
	-40				18,0			-5,0	-0,0165	-6,1	-0,0210

Таблица Е.2 – Асимметрия третьей гармоники тягового тока в местах подключения аппаратуры РЦ

№ п/п	Температура, °С	Сопротивления рельсовых нитей						Асимметрия тягового тока			
		Удельные сопротивления				Коэффициенты асимметрии		В начале рельсовой линии		В конце рельсовой линии	
		Продольные $\times e^{-j71^\circ}$, Ом/км		Поперечные, Ом·км		$k_{AZ}^{пр}$	$k_{AZ}^{пп}$	Абсолютная величина, А	Относительная величина	Абсолютная величина, А	Относительная величина
		z_{PH1}	z_{PH2}	r_{P31}	r_{P32}						
1	+20	0,890	0,890	0,45	0,50	0	0,0588	2,4	0,0197	-1,3	-0,0585
	+20	0,890	0,890	16,0	18,0	0	0,0588	0,6	0,0049	0,3	0,0022
	-40	0,644	0,644	16,0	18,0	0	0,0588	0,5	0,0045	0,3	0,0024
2	+20	0,847	0,953	0,50	0,50	0,0588	0	2,3	0,0194	1,6	0,0635
	+20	0,847	0,953	18,0	18,0	0,0588	0	4,4	0,0363	4,4	0,0381
	-40	0,613	0,684	18,0	18,0	0,0588	0	3,6	0,0303	3,7	0,0315
3	+20	0,847	0,953	0,45	0,50	0,0588	0,0588	4,7	0,0389	0,1	0,0064
	+20	0,847	0,953	16,0	18,0	0,0588	0,0588	4,9	0,0411	4,7	0,0403
	-40	0,613	0,684	16,0	18,0	0,0588	0,0588	4,2	0,0347	4,0	0,0339
4	+20	0,953	0,847	0,45	0,50	0,0588	0,0588	0	0	-2,8	-0,1231
	+20	0,953	0,847	16,0	18,0	0,0588	0,0588	-3,8	-0,0313	-4,2	-0,0358
	-40	0,684	0,613	16,0	18,0	0,0588	0,0588	-3,1	-0,0256	-3,4	-0,0291
5	-10	0,767	0,767	3,9	18,0	0	0,6429	15,4	0,1279	4,4	0,0405
	-10	0,730	0,821	3,9	18,0	0,0588	0,6429	18,9	0,1578	8,2	0,0756
	-10	0,821	0,730	3,9	18,0	0,0588	0,6429	11,8	0,0980	0,6	0,0054
6	+20	Неоднородная рельсовая линия			0,50	Неоднородная рельсовая линия		3,5	0,0294	-2,8	-0,1096
	+20				1,50			5,0	0,0417	-3,1	-0,0507
	-40				18,0			-1,3	-0,0110	-2,0	-0,0174

При наличии и продольной, и поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей характер изменения асимметрии тягового тока по мере его протекания по рельсовой линии схож с ситуацией, когда присутствует только поперечная асимметрия сопротивлений, но разница между значениями асимметрии тягового тока в начале и в конце рельсовой линии меньше.

Сопротивление третьей гармонике тягового тока секций основных обмоток ДТ, играющих роль балластных сопротивлений, в три раза выше, чем их сопротивление первой гармонике. В результате в большинстве рассмотренных случаев коэффициент третьей гармоники тягового тока на входном и выходном концах РЦ меньше, чем первой гармоники. Исключения составляют ситуации с повышенной утечкой тягового тока из одной рельсовой нити в землю, которые наблюдаются при промерзании только верхней части грунта или при ухудшении состояния искровых промежутков в цепях заземления опор контактной сети на рельс, т.к. третья гармоника интенсивнее стекает из рельсов в землю.

Приложение Ж

Уравнивание тяговых токов дросселями в рельсовых нитях на перегоне Паприха – Туфаново

Рассмотрен перегон Паприха – Туфаново, предоставленный для расчётов научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»). Перегон представляет собой второй путь с электрификацией на переменном токе на участке Буй – Вологда Северной железной дороги. Перегон имеет двухстороннее движение и оборудован бесстыковыми ТРЦ с уравнивающими дросселями, места установки которых показаны на рисунке Ж.1.

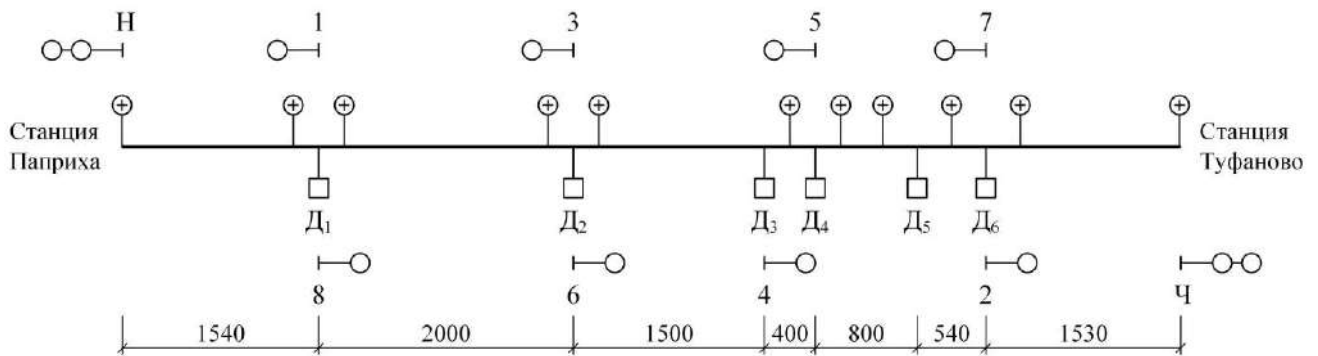


Рисунок Ж.1 – План перегона

На рисунке Ж.2 показан полученный график изменения асимметрии тягового тока под катушками АЛС при движении поезда в чётном направлении при минимальном и максимальном удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле. На рисунке Ж.3 показан подобный график при движении поезда в противоположном направлении. Рельсовая линия на перегоне имеет плетевой путь, поэтому рассматривалось влияние только поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей. Коэффициент асимметрии сопротивлений при этом взят равным 0,0588.

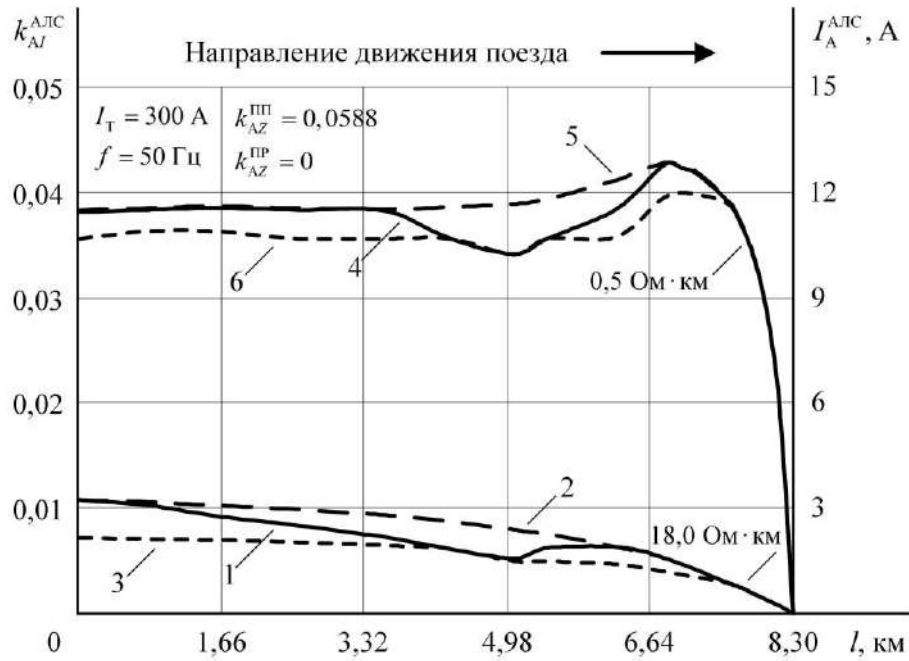


Рисунок Ж.2 – Асимметрия первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по перегону в чётном направлении

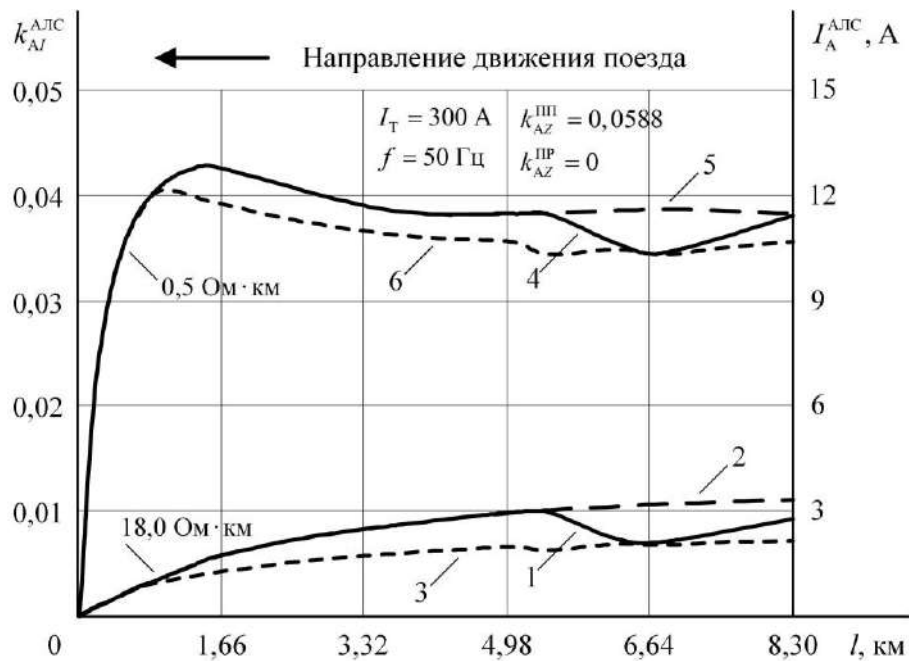


Рисунок Ж.3 – Асимметрия первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по перегону в нечётном направлении

Кривые 1 и 4 получены при условии, что уравнивающие дроссели $D_1 - D_6$ установлены в местах, показанных на рисунке Ж.1, кривые 2 и 5 – при условии, что

убраны дроссели D_4 и D_5 , а кривые 3 и 6 – при условии, что добавлены четыре дросселя в серединах блок-участков, длины которых 1,5 км и больше.

Из графиков видно, что при установке уравнивающих дросселей в соответствии с рисунком Ж.1 максимум асимметрии тягового тока наблюдается на расстоянии примерно 1,5 км от конца перегона, если поезд движется в чётном направлении (кривые 1 и 4 на рисунке Ж.2), и на таком же расстоянии, если поезд движется в противоположном направлении (кривые 1 и 4 на рисунке Ж.3).

Если дроссели D_4 и D_5 отсутствуют, то в этих точках абсолютная величина асимметрии возрастает примерно на 1,2 А (кривые 2 и 5). При дополнительной установке четырёх уравнивающих дросселей, величина асимметрии тягового тока снижается в среднем по длине перегона примерно на 1,1 А (кривые 3 и 6).

Для рассматриваемых условий по формуле (3.1) получены значения критерия δk_d , позволяющего количественно оценить степень уравнивания тягового тока под катушками АЛС в каждой точке пути. На рисунке Ж.4 представлен график изменения критерия δk_d при движении поезда в чётном направлении, а на рисунке Ж.5 – при движении поезда в противоположном направлении.

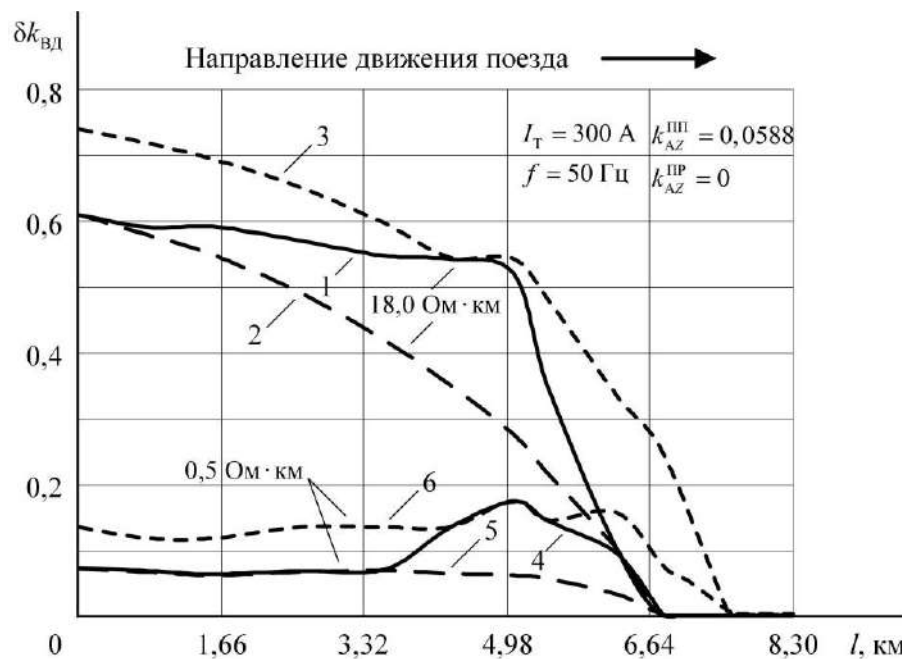


Рисунок Ж.4 – Изменение критерия δk_d при движении поезда по перегону в чётном направлении

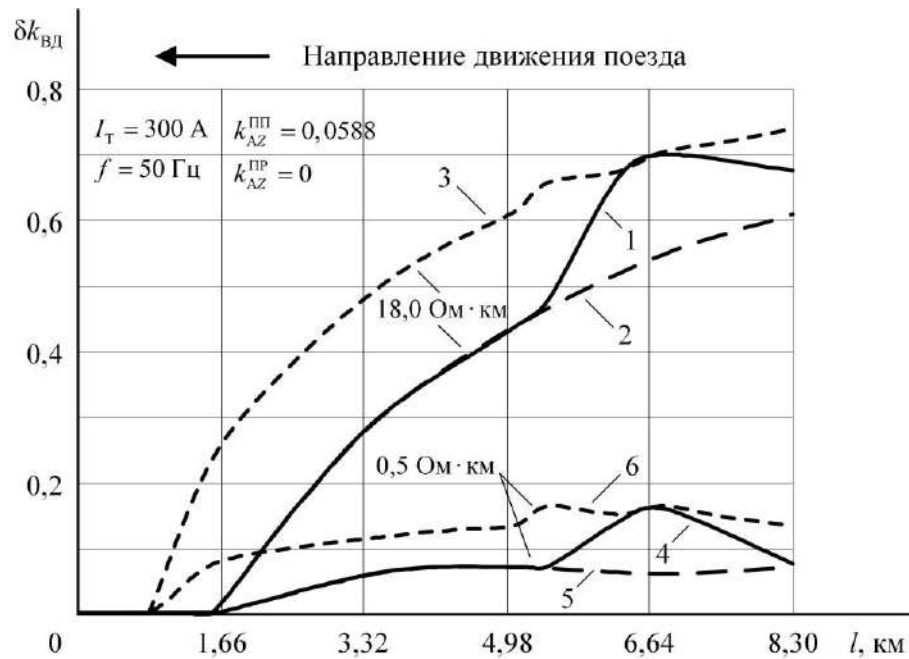


Рисунок Ж.5 – Изменение критерия $\delta k_{д}$ при движении поезда по перегону в нечётном направлении

С ростом сопротивлений рельсов по отношению к земле значение критерия $\delta k_{д}$ увеличивается. При максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле и при движении поезда в чётном направлении первые 5 км величина данного критерия находится в пределах 0,55 – 0,60, т.е. асимметрия тягового тока под катушками АЛС снижается на 55 – 60 % (кривая 1 на рисунке Ж.4). Когда поезд проезжает точку подключения дросселя Д₃, значение критерия $\delta k_{д}$ резко снижается.

Если дроссели Д₄ и Д₅ отсутствуют, величина критерия $\delta k_{д}$ убывает более монотонно (кривая 2 на рисунке Ж.4). При дополнительной установке ещё четырёх дросселей первые 4,5 км значение данного критерия больше, чем в предыдущих случаях, и при вступлении поезда на перегон составляет 0,74 (кривая 3 на рисунке Ж.4).

Если поезд движется в нечётном направлении, значение критерия $\delta k_{д}$ уменьшается с 0,70 до 0,46 на участке между дросселями Д₄ и Д₅ (кривая 1 на рисунке Ж.5). Следовательно, при отсутствии этих двух дросселей значение критерия $\delta k_{д}$

уменьшается только на первых 3,0 км (кривая 2 на рисунке Ж.5). Степень уравнивания тягового тока при более частой установке дросселей слабо зависит от направления движения (кривая 3 на рисунке Ж.5).

При минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле степень снижения асимметрии тягового тока уравнивающими дросселями меньше, чем при максимальном. Если дроссели установлены в соответствии с рисунком Ж.1, то величина критерия δk_d находится в пределах 0,07 – 0,08, достигая максимального значения, равного 0,18 в точке подключения дросселя D_4 при движении в чётном направлении (кривая 4 на рисунке Ж.4) и в точке подключения дросселя D_6 при движении в нечётном направлении (кривая 4 на рисунке Ж.5). При отсутствии дросселей D_4 и D_5 отсутствуют и данные максимумы (кривые 5 на рисунках Ж.4 и Ж.5). При более частой установке уравнивающих дросселей величина критерия δk_d в среднем может достигать 0,14 (кривые 6 на рисунках Ж.4 и Ж.5).

Таким образом, применение уравнивающих дросселей сильнее всего снижает асимметрию гармоник тягового тока при промёрзшем и сухом грунте. В случае отсутствия дросселей D_4 и D_5 асимметрия тягового тока под катушками АЛС на данном участке перегона не превышает максимальных значений этой асимметрии на других участках. Дополнительная установка дросселей в серединах четырёх наиболее длинных блок-участков снижает величину асимметрии тягового тока незначительно, чуть больше, чем на 1 А.

Приложение 3

Испытания компенсатора помех в лабораторных условиях

Цель проводимых экспериментальных исследований – оценка степени ослабления помех при использовании разработанного способа компенсации гармонических помех в сигналах РЦ и АЛС. На разработанном и изготовленном лабораторном образце одного из вариантов технической реализации этого способа проводились измерения токов и напряжений в выбранных точках схемы.

На рисунке 3.1 представлена схема лабораторного стенда для испытания компенсатора помех. Для ослабления полезного сигнала на несущей частоте 25 Гц использован LC -фильтр, а вычитание напряжений сигналов помех из принятого сигнала обеспечивалось трансформатором напряжения при встречном включении его первичных обмоток. Кодовые импульсы создавались низкочастотным генератором типа ГЗ-109 и кодовым путевым трансмиттером типа КПТШ-5. В качестве трансформатора напряжения использовался трансформатор типа ПТ-25АУЗ, а нагрузкой Z_H был резистор с сопротивлением 2 кОм.

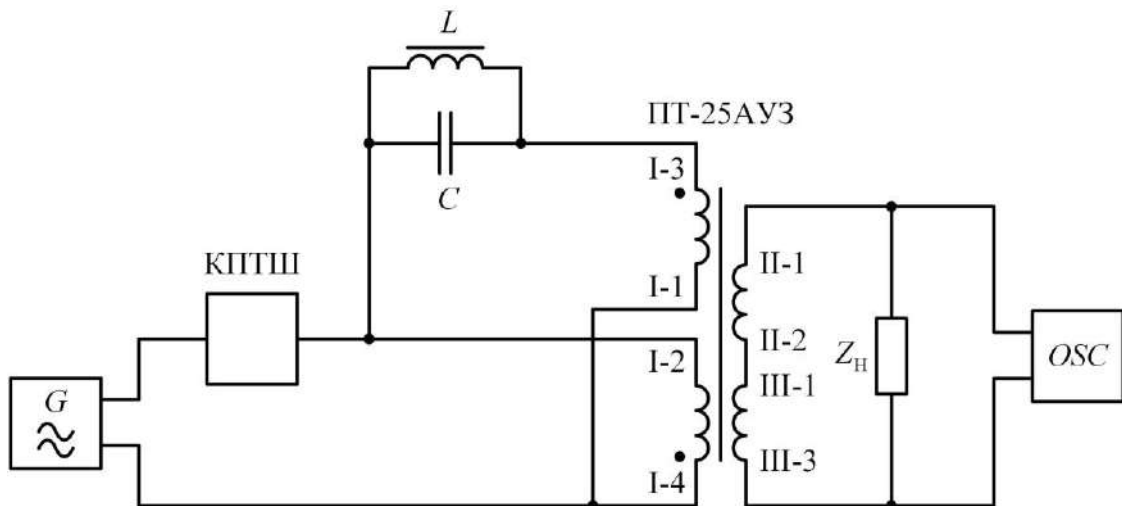


Рисунок 3.1 – Схема лабораторного стенда для испытания компенсатора помех

В резонансном LC -контуре в качестве ёмкости C величиной 96 мкФ применялись шесть блоков конденсаторов типа КБ-4×4, соединённые параллельно. Индуктивность L величиной 0,423 Гн – это последовательно соединённые три реактора типа РОБС-3А. Резонансная частота контура, найденная по формуле $\omega_p^2 = 1/LC$, составляет $f_p = 24,975 \approx 25$ Гц. Амплитудно-частотная характеристика контура показана на рисунке 3.2, а коэффициент ослабления сигналов разных частот режекторным фильтром, равный отношению входного для данного фильтра сигнала к выходному, показан на рисунке 3.3.

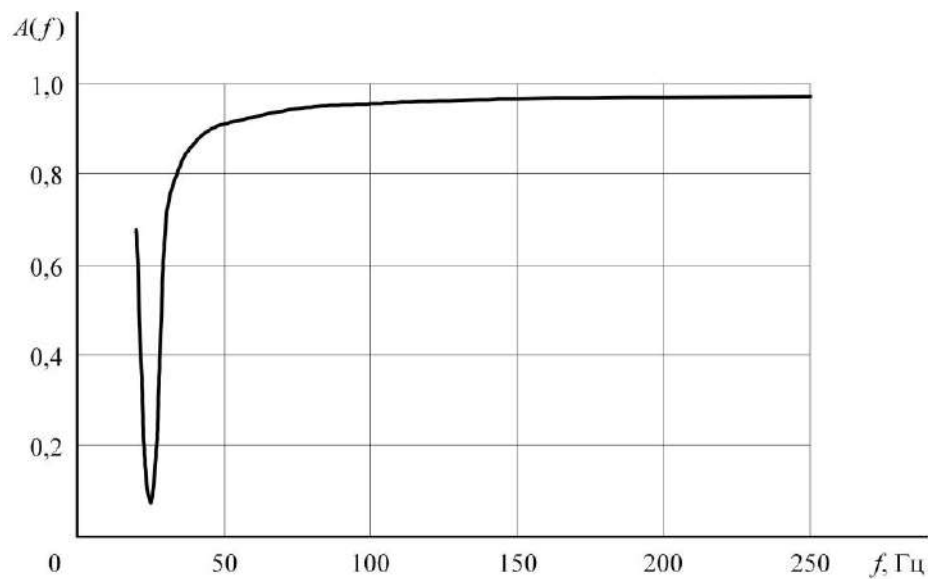


Рисунок 3.2 – Амплитудно-частотная характеристика LC -контура

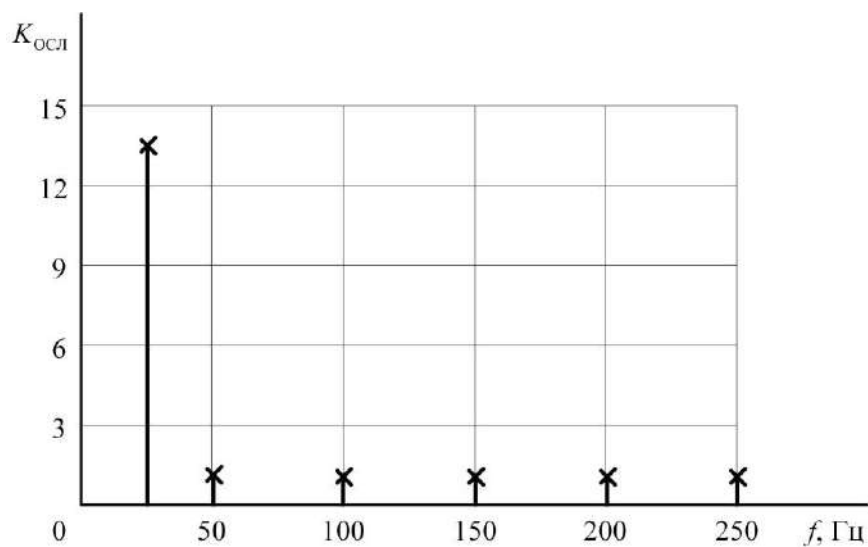


Рисунок 3.3 – Коэффициент ослабления сигналов разных частот LC -контуром

Из амплитудно-частотной характеристики LC -контура (рисунок 3.2) видно, что на выходе контура остаётся не скомпенсированным относительно большой сигнал помехи с частотой 50 Гц и остаётся напряжение на сигнальной частоте. Повышение степени ослабления помех обеспечивалось усилением компенсирующего сигнала на частоте 50 Гц.

Усилитель собран на операционном усилителе типа КР140УД608 (рисунок 3.4). Усиление компенсирующего сигнала в 1,1 раз заметно уменьшило уровень помех на выходе компенсатора. Сопротивление резистора R_1 было равно 5,1 кОм, а сопротивление резистора R_2 было 5,6 кОм. Сопротивление резистора R_3 взято равным 10,7 кОм.

Для оценки качества фильтрации помех компенсатора по частотным характеристикам измерялись токи и напряжения в выбранных местах его схемы, показанных на рисунке 3.4. В качестве вольтметров V_1, V_2, V_3, V_4 применены осциллографы-мультиметры типа Fluke 123 Industrial Scopemeter (класс точности 0,2 в режиме измерения величины напряжений). Токи измерялись в указанных точках A_1, A_2 тестером-мультиметром типа Ц4380М (класс точности 2,5).

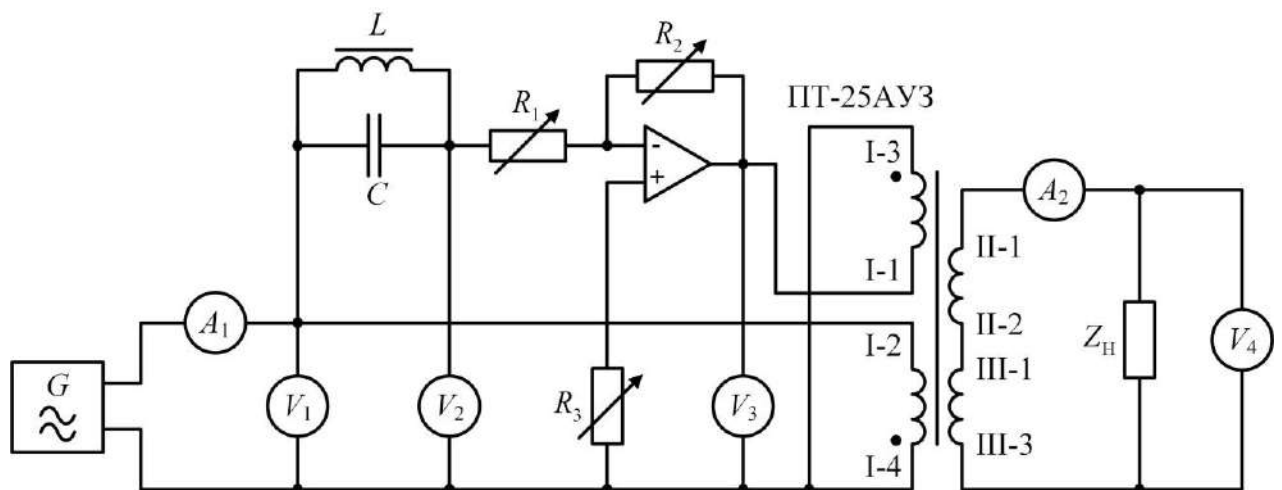


Рисунок 3.4 – Схема подключения измерительных приборов к лабораторному макету компенсатора помех

При изменении частоты генератора и неизменном его напряжении U_1 измерялись напряжения на выходе режекторного фильтра U_2 , на выходе усилителя U_3 и на нагрузке U_4 , а также входной ток I_1 и ток во вторичной обмотке суммирующего трансформатора I_2 . Результаты измерений приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерения напряжений, токов и обработки результатов для сигнала частотой 25 Гц

f , Гц	U_1 , В	U_2 , В	U_3 , В	U_4 , мВ	I_1 , мА	I_2 , мА	$S_{\text{ВХ}}$, мВА	$S_{\text{ВЫХ}}$, мВА	$K_{\text{ОСЛ}}$	L , дБ
25	0,187	0,014	0,015	76,4	0,068	0,038	0,0127	0,0029	2,4	7,8
50	1,955	1,773	1,950	16,4	0,719	0,007	1,4056	0,0001	119,2	41,5
75	0,034	0,032	0,035	0,49	0,012	0	0,0004	0,0000	–	–
100	0,007	0,007	0,008	0,13	0,003	0	0,0000	0,0000	53,8	34,4
150	0,148	0,143	0,157	3,20	0,054	0,001	0,0080	0,0000	46,2	33,3
250	0,034	0,033	0,036	0,82	0,013	0	0,0004	0,0000	41,5	32,4

По измеренным значениям токов и напряжений вычислялись следующие величины:

– коэффициент ослабления сигнала компенсатором

$$K_{\text{ОСЛ}} = \frac{U_1}{U_4};$$

– мощность сигнала на входе компенсатора

$$S_{\text{ВХ}} = U_1 I_1;$$

– мощность сигнала на вторичной обмотке суммирующего трансформатора, т.е. выходе компенсатора

$$S_{\text{ВЫХ}} = U_4 I_2.$$

На рисунке 3.5 приведён график коэффициента ослабления компенсатором сигналов разных частот. Полезный сигнал на частоте 25 Гц ослаблялся в 2,4 раза, или на 7,8 дБ. Помеха на частоте 50 Гц ослаблялась в 119,2 раза, а на частоте 150 Гц – в 46,2 раза, или на 41,5 дБ и 33,3 дБ соответственно (рисунок 3.6).

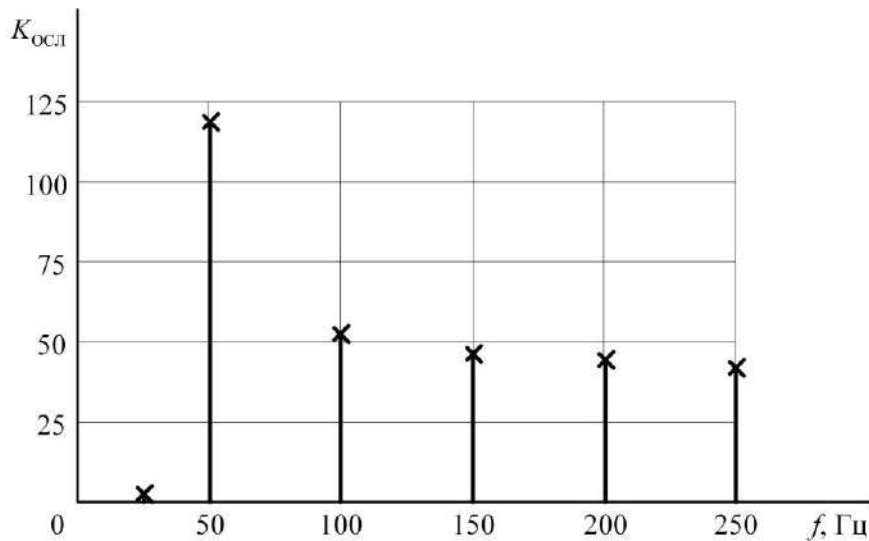


Рисунок 3.5 – Коэффициент ослабления сигналов разных частот компенсатором

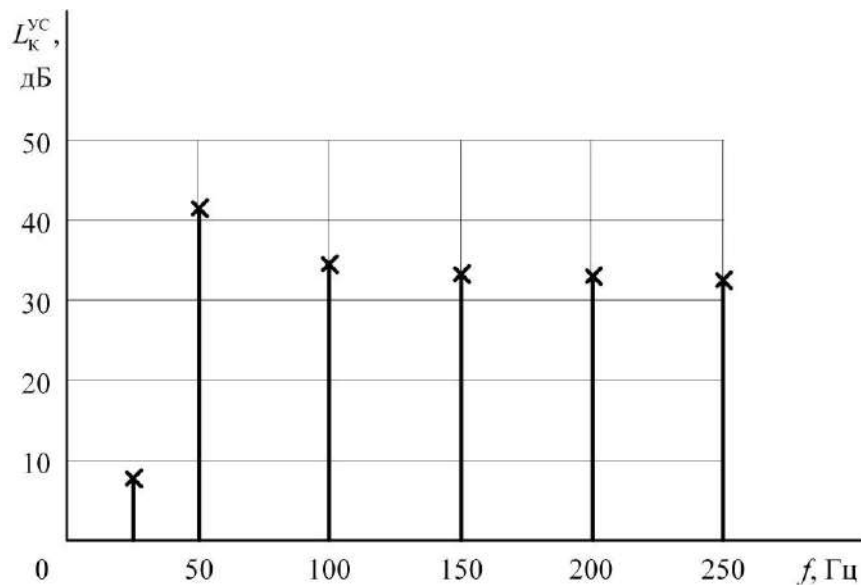


Рисунок 3.6 – Ослабление сигналов разных частот компенсатором

Отношение мощности сигнала к сумме мощностей помех на входе составило примерно 1/110, на выходе компенсатора эта величина стала равной 25/1.

При проведении эксперимента установлено, что увеличение величины входного сигнала не влияло на качество работы компенсатора помех, т.к. в нём использовались катушки индуктивности с большим поперечным сечением их сердечников.

При частоте полезного сигнала 75 Гц в резонансном LC -контуре применяются ёмкость C величиной 16 мкФ, полученная одним блоком конденсаторов типа КБ-4×4, и индуктивность L величиной 0,282 Гн, полученная последовательным соединением двух реакторов типа РОБС-3А. В этом случае резонансная частота контура составляет $f_p = 74,926 \approx 75$ Гц. Амплитудно-частотная характеристика контура показана на рисунке 3.7, а коэффициент ослабления сигналов разных частот режекторным фильтром показана на рисунке 3.8.

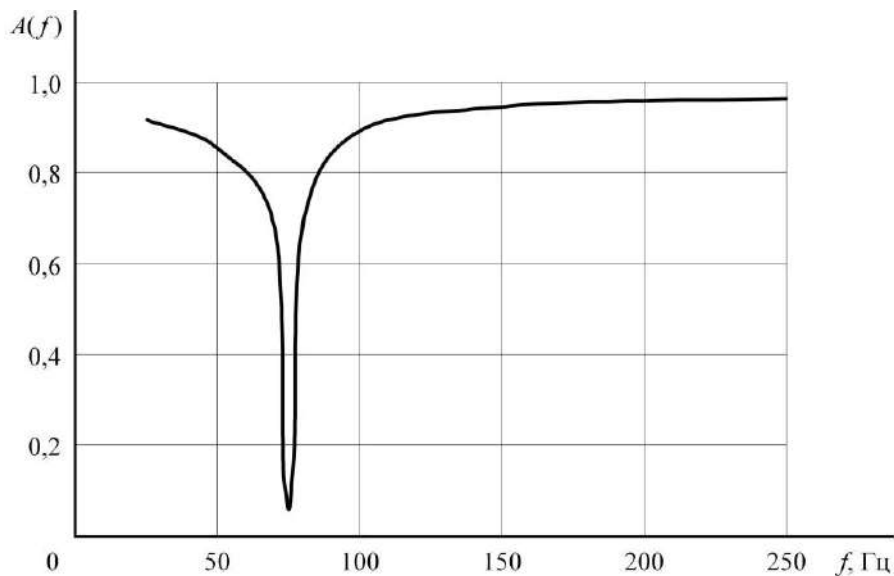


Рисунок 3.7 – Амплитудно-частотная характеристика LC -контура, настроенного на частоту 75 Гц

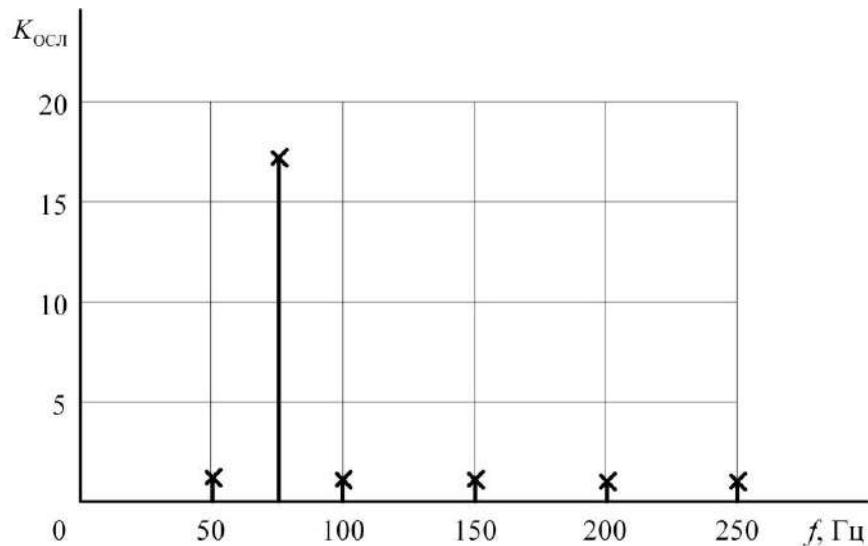


Рисунок 3.8 – Коэффициент ослабления сигналов разных частот LC -контуром, настроенного на частоту 75 Гц

Из рисунка 3.7 видно, что для полного подавления помехи частотой 50 Гц увеличить компенсирующий сигнал на данной частоте необходимо с коэффициентом усиления, равным 1,16. Такой коэффициент усиления получен в схеме на рисунке 3.4 при сопротивлении резистора $R_1 = 3,6$ кОм и сопротивлении резистора $R_2 = 4,2$ кОм. Сопротивление резистора $R_3 = 7,8$ кОм. Результаты измерений сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты измерения напряжений, токов и обработки результатов для сигнала частотой 75 Гц

f , Гц	U_1 , В	U_2 , В	U_3 , В	U_4 , мВ	I_1 , мА	I_2 , мА	$S_{ВХ}$, мВА	$S_{ВЫХ}$, мВА	$K_{осл}$	L , дБ
25	0,034	0,031	0,037	0,79	0,009	0	0,0003	0,0000	–	–
50	1,955	1,675	1,955	17,2	0,515	0,008	1,0068	0,1376	113,7	41,1
75	0,187	0,011	0,013	76,9	0,050	0,035	0,0094	2,6915	2,4	7,7
100	0,007	0,006	0,007	0,11	0,002	0	0,0000	0,0000	63,6	36,1
150	0,148	0,141	0,164	5,68	0,039	0,002	0,0058	0,0114	26,1	28,3
250	0,034	0,033	0,038	1,62	0,009	0,001	0,0003	0,0016	21,0	26,5

График коэффициента ослабления сигналов разных частот компенсатором помех с режекторным фильтром, настроенным на частоту 75 Гц, приведён на рисунке 3.9. Полезный сигнал на частоте 75 Гц ослаблялся в 2,4 раза, т.е. на 7,7 дБ. Помеха на частоте 50 Гц ослаблялась в 113,7 раза, а на частоте 150 Гц – в 26,1 раза т.е. на 41,1 дБ и 28,3 дБ соответственно (рисунок 3.10).

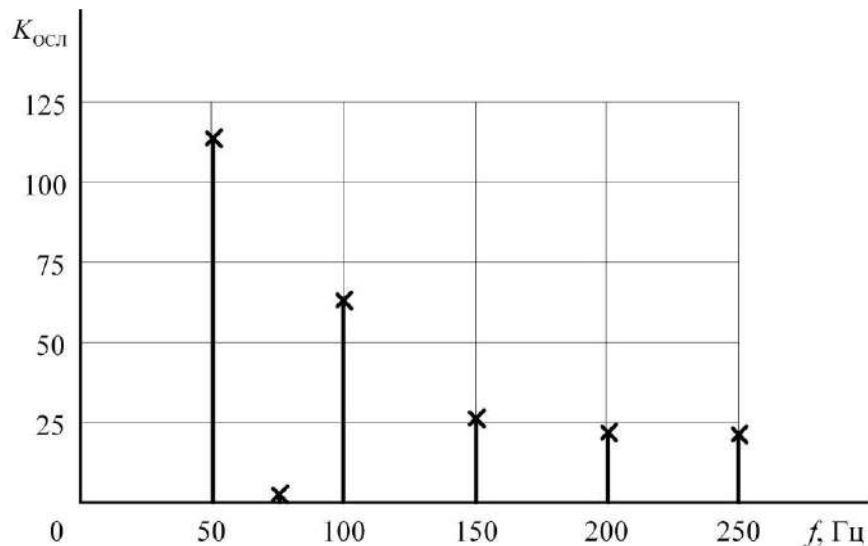


Рисунок 3.9 – Коэффициент ослабления сигналов разных частот компенсатором с режекторным фильтром, настроенным на 75 Гц

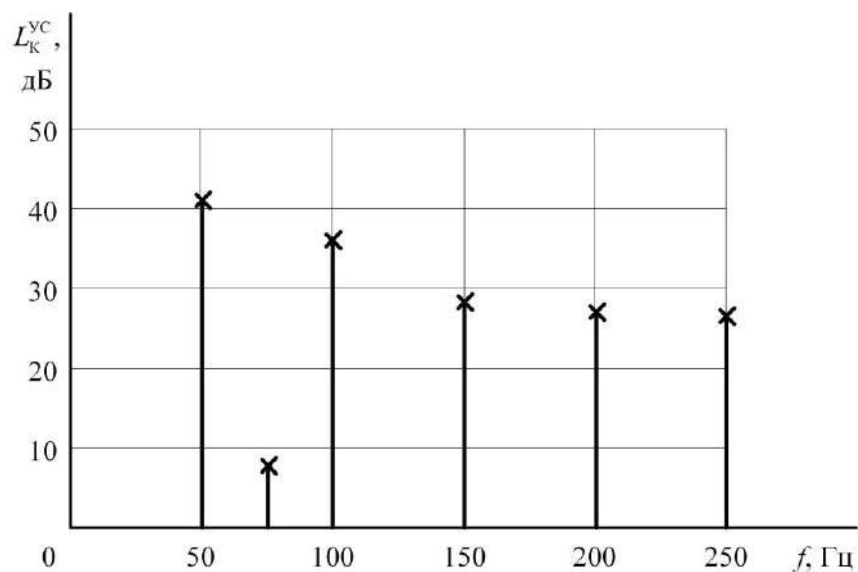


Рисунок 3.10 – Ослабление сигналов разных частот компенсатором с режекторным фильтром, настроенным на 75 Гц

Усиление компенсирующего сигнала приводит к существенному увеличению коэффициента ослабления помехи на частоте 50 Гц, но при этом данный коэффициент уменьшается на частотах 150 Гц и 250 Гц. Вызвано это тем, что компенсирующий сигнал на этих частотах становится больше напряжений этих составляющих в принятом сигнале.

Для оценки степени искажения компенсатором формы импульсов сигнального тока была записана осциллограмма сигнала на выходе компенсатора помех для кодовой комбинации зелёного огня осциллографом-мультиметром типа Fluke 123 Industrial Scopemeter при масштабе 200 мс/деление (рисунок 3.11).

Сглаживание компенсатором крутизны фронта и крутизны спада импульсов в сигналах кодовых комбинаций происходит за счёт используемых его индуктивностей. Однако амплитуда, длительности импульсов и интервалов в кодовых сигналах остаются достаточными для корректной работы локомотивного дешифратора. В лабораторном образце использовались серийно выпускаемые дроссели, рассчитанные на мощности, заметно превышающие те, которые нужны для компенсатора помех. Это повлияло отрицательно на степень искажения импульсов кода.

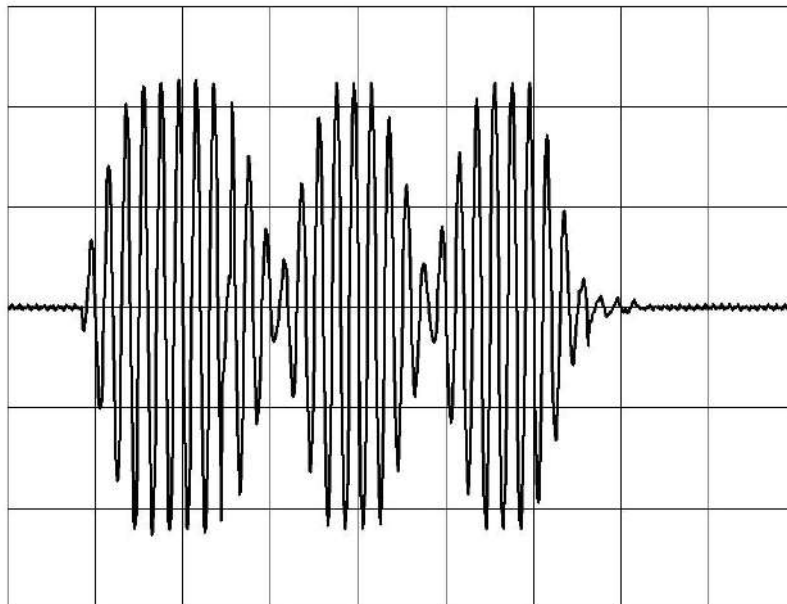


Рисунок 3.11 – Осциллограмма сигнала для кодовой комбинации зелёного огня на выходе компенсатора помех

В таблице 3.3 приведены результаты ослабления гармонических сигналов на разных частотах серийно выпускаемым локомотивным фильтром типа ФЛ-25/75М и разработанным компенсатором.

Таблица 3.3 – Ослабление гармонических сигналов
фильтром ФЛ-25/75М и компенсатором

Частота, Гц	Коэффициент ослабления сигнала				Ослабление сигнала, дБ			
	Фильтр ФЛ-25/75М		Компенсатор на 25 Гц	Компенсатор на 75 Гц	Фильтр ФЛ-25/75М		Компенсатор на 25 Гц	Компенсатор на 75 Гц
	По ТУ	Фактически	Фактически	Фактически	По ТУ	Фактически	Фактически	Фактически
25	2,2 – 2,5	4,1	2,4	–	6,8 – 8,0	12,3	7,6	–
50	≥ 1000	50,0	119,2	113,7	≥ 60	34,0	41,5	41,1
75	6,7 – 7,5	11,9	–	2,4	16,5 – 17,5	21,5	–	7,6
100	≥ 40	32,3	53,8	63,6	≥ 32	30,2	34,6	36,1
150	≥ 500	83,3	46,2	26,1	≥ 54	38,4	33,3	28,3

Сравнение данных таблицы 3.3 показало, что компенсатор гораздо лучше ослаблял помехи на частотах 50 и 100 Гц и меньше ослаблял сигнальное напряжение. Хуже ослаблялась помеха на частоте 150 Гц. Однако помеха на частоте 50 Гц является наиболее значимой с точки зрения помехоустойчивости системы АЛСН, т.к. с повышением частоты сигнала помехи её напряжение уменьшается.

Таким образом, испытания опытного образца компенсатора в лабораторных условиях подтвердили, что использование разработанного способа компенсации помех в приёмниках АЛСН позволяет повысить коэффициент ослабления помех в среднем в 2 раза по сравнению с серийно выпускаемым локомотивным фильтром типа ФЛ-25/75М.